Российская Академия Наук

**Отделение наук о Земле**

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУК О ЗЕМЛЕ

**ТЕЗИСЫ**

**Всероссийской научной конференции**
**г. Москва, 11–15 апреля 2022 г.**

**Москва**
**2022 г.**

УДК 55
С 56

**Современные проблемы наук о Земле:** тезисы Всероссийской научной конференции (г. Москва, 11–15 апреля 2022 г.). – М.: РАН, 2022. – 332 с., – 18 илл.
ISBN 978-5-907366-66-4

В сборнике представлены расширенные тезисы докладов, представленные на конференции, организованной Отделением наук о Земле Российской академии наук.

Конференция была организована в форме работы двух секций: «Современные проблемы геологии, геофизики, геохимии и горных наук», в рамках которой были представлены доклады по актуальным вопросам современной геологии, включая геологию рудных месторождений, минералогию, петрологию, геохимию с акцентом на осадочные породы, а также новейшие результаты исследований в области геофизики, сейсмологии и вулканологии. Вторая секция «Современные проблемы океанологии, физики атмосферы и географии» включала доклады не только по перечисленным направлениям географической науки, но и сообщения, отражающие современные представления о причинах изменений климата, вопросы общественной и социальной географии, результаты палеогеографических исследований и новейшие данные в области изучения вечной мерзлоты.

Сборник будет интересен для специалистов, интересующихся современными результатами в области наук о Земле, а также студентам и аспирантам геологических и географических факультетов университетов и Вузов.

**УДК 55**

Тексты тезисов опубликованы с сохранением авторской редакции.

ISBN 978-5-907366-66-4

© ОНЗ РАН

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Секция**

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ, ГЕОХИМИИ И ГОРНЫХ НАУК

## ГЕОЛОГИЯ


| | | |
|---|---|---|
| ***Матуль М.А.*** | Природные условия и процессы седиментации в полярном океане сейчас и в геологическом прошлом | **11** |
| ***Барабошкин Е.Ю.*** | Опорные разрезы меловой системы России и совершенствование стратиграфической шкалы | **14** |
| ***Герман А.Б.*** | Палеофлористика, стратиграфия, палеоклиматология, флорогенез: новые методы и новые результаты | **17** |
| ***Еремин Н.А.*** | Создание энергоэффективных, ресурсосберегающих, импортозамещающих и экологически чистых технологий поиска, разведки и разработки месторождений углеводородов | **19** |
| ***Захаров В.С.*** | Континентальная коллизия и андерплейтинг: результаты численного моделирования и геодинамические интерпретации | **22** |
| ***Козаков И.К.*** | Этапы формирования метаморфических комплексов центрального сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) | **26** |
| ***Козлов Н.Е.*** | Геология докембрия и проблемы эволюции древнейших комплексов (на примере Кольского региона) | **28** |
| ***Кузнецов Н.Б.*** | Тектонические и палеогеографические перестройки осадочных бассейнов неогея Восточно-Европейской платформы, ее Тиманской, Уральской и крымско-Кавказской периферии | **31** |
| ***Лейченков Г.Л.*** | Современные проблемы геологии Антарктики | **34** |
| ***Лубнина Н.В.*** | Перемагничивание пород: от глобальных реконструкций до региональных задач | **37** |
| ***Лучицкая М.В.*** | Гранитоидный магматизм и формирование континентальной коры Северо-Востока Азии в мезозое–кайнозое | **39** |
| ***Михайлов Н.Н.*** | Геолого-физические факторы влияния внутрипоровых межфазных взаимодействий на изучение и освоение залежей углеводородов | **42** |
| ***Никишин А.М.*** | Геологическая и тектоническая модель формирования Арктического океана | **44** |
| ***Носова А.А.*** | Внутриплитный магматизм как индикатор геологической эволюции крупных континентальных блоков | **46** |
| ***Перчук А.Л.*** | Режимы докембрийской субдукции по результатам численного моделирования | **49** |

| | | |
|---|---|---|
| ***Рассказов А.А.*** | Лимногеология – новое, актуальное направление в науках о Земле | **52** |
| ***Савко К.А.*** | Ранний докембрий Восточной Сарматии: история формирования континентальной литосферы | **55** |
| ***Сафонов О.Г.*** | Модели образования гранулитовых комплексов в связи с эволюцией континентальной коры | **58** |
| ***Силантьев С.А.*** | Процессы образования и эволюции океанической литосферы в главных геодинамических обстановках Земли | **61** |
| ***Слабунов А.И.*** | Геология и геодинамика ранней Земли: основные проблемы и пути решения | **62** |

## ГЕОЛОГИЯ; ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ; ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА НЕФТИ И ГАЗА

| | | |
|---|---|---|
| ***Соловьев А.В.*** | Количественные оценки скоростей тектонических процессов: методология и результаты | **64** |
| ***Ступакова А.В.*** | Современные технологии развития науки геологии нефти и газа | **67** |
| ***Толмачева Т.Ю.*** | Биостратиграфия и палеогеография ордовика Северной Евразии: результаты 30-летнего изучения конодонтов | **68** |
| ***Шипилов Э.В.*** | Трансрегиональные зоны сдвига и Амеразийская микроплита в геодинамической эволюции океана в Арктике | **71** |
| ***Бяков А.С.*** | Пермский этап геологической истории Северо-Востока России: био- и хемостратиграфия, изотопное датирование, геобиосферные события, палеогеография | **74** |
| ***Кемкин И.В.*** | Геодинамическая эволюция центрального сектора Тихоокеанской окраины Азии в мезозое | **77** |
| ***Калинин Ю.А.*** | Золотоносные эндогенные и экзогенные рудообразующие системы | **80** |
| ***Толстых Н.Д.*** | Рудогенез массивных ЭПГ-Cu-Ni сульфидных руд (Талнахская интрузия) и эпитермального золоторудного месторождени Малетойваям (Камчатка) | **83** |
| ***Травин А.В.*** | Термохронология благородно-, редкометалльных рудно-магматических систем | **86** |
| ***Фридовский В.Ю.*** | Рудообразующие системы и литосферный контроль локализации позднемезозойских орогенных золоторудных месторождений | **89** |
| ***Бычков А.Ю.*** | Физико-химические методы исследования гидротермальных рудных месторождений | **91** |
| ***Викентьев И.В.*** | Полигенные рудообразующие системы колчеданных месторождений | **93** |

| | | |
|---|---|---|
| ***Волков А.В.*** | Рудообразующие системы крупных месторождений стратегических металлов России: закономерности размещения, условия образования, новые подходы к прогнозированию | **96** |
| ***Криволуцкая Н.А.*** | Сибирские траппы и PGE-Cu-Ni месторождения Арктической зоны Восточной Сибири | **98** |
| ***Кулешов В.Н.*** | Месторождения и руды марганца: генезис, классификация геохимия изотопов ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) | **101** |
| ***Шпуров И.В.*** | Задачи геологической науки в условиях энергоперехода | **104** |
| ***Бурштейн Л.М.*** | Актуальные проблемы теории нафтидогенеза и методики количественного прогноза нефтегазоносности. Результаты и перспективы | **106** |
| ***Буслов М.М.*** | Строение и эволюция формирования Евразийского континента: глобальная геодинамика и корреляция геологических процессов | **109** |
| ***Деев Е.В.*** | Актуальные направления исследований региональной геологии и нефтегазоносности мезозойско-кайнозойских осадочных бассейнов севера Центральной Азии и Российской Арктики | **111** |
| ***Ельцов И.Н.*** | Геофизика и физика нефтяного пласта (теория, программное обеспечение, эксперименты) | **114** |
| ***Федотов А.П.*** | Реконструкции геологической истории развития Восточной Сибири и Северной Монголии в позднем кайнозое на основе био-геохимических летописей из озерных донных отложений | **116** |

## СТРАТИГРАФИЯ, ПАЛЕОНТОЛОГИЯ; МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ; ГЕОХИМИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД; ГЕОФИЗИКА, СЕЙСМОЛОГИЯ

| | | |
|---|---|---|
| ***Боескоров Г.Г.*** | Исследование млекопитающих плейстоцена Якутии | **118** |
| ***Гражданкин Д.В.*** | Стратиграфия и палеонтология верхнего протерозоя: состояние исследований, проблемы и перспективы | **121** |
| ***Никитенко Б.Л.*** | Мезозойские арктические и бореальные бассейны: микробиота, стратиграфия, биофации и палеогеография | **122** |
| ***Сенников Н.В.*** | Стратиграфия палеозойских бассейнов Сибири – актуальные геохронологические, палеонтологические, событийные и палеогеографические данные | **125** |
| ***Изох А.Э.*** | Петрология, геодинамика и рудоносность ультрамафит-мафитовых ассоциаций Центральной и Юго-Восточной Азии | **128** |
| ***Корсаков А.В.*** | КР-картирование включений в минералах высокобарических пород | **130** |
| ***Пальянов Ю.Н.*** | Экспериментальная минералогия алмаза | **133** |
| ***Перепелов А.Б.*** | След субдукции в магматизме обстановок конвергенции и внутриплитной активизации (Камчатка, Центральная Азия) | **135** |
| ***Цыганков А.А.*** | Петрология конвергентных и постколлизионных ультрамафит-мафитовых и гранитоидных серий | **138** |

| | | |
|---|---|---|
| ***Бушнев Д.А.*** | Геохимия органического вещества осадочных пород | **140** |
| ***Гаврилов Ю.О.*** | Геохимическая эволюция осадочных комплексов Большого Кавказа в мезозое-кайнозое: влияние региональных и глобальных факторов | **143** |
| ***Дубинин А.В.*** | Фракционирование редкоземельных элементов в пелагических донных отложениях океана | **145** |
| ***Левитан М.А.*** | Количественные параметры седиментации в плейстоцене Мирового океана | **147** |
| ***Летникова Е.Ф.*** | Возможности геохимических и изотопных методов при изучении осадочных и осадочно-вулканогенных комплексов | **149** |
| ***Покровский Б.Г.*** | Изотопная геохимия осадочных пород Северной Евразии | **151** |
| ***Тучкова М.И.*** | Геохимия осадочных пород при палеореконструкциях | **154** |
| ***Гусяков В.К.*** | Оценка опасности и прогнозирование цунами на морских побережьях России | **156** |
| ***Еманов А.Ф.*** | Многомасштабные сейсмологические исследования и развитие цифровой обработки сейсмических сигналов | **158** |
| ***Метелкин Д.В.*** | Палеомагнетизм Сибири и Арктики, региональные и глобальные палеотектонические модели и приоритеты | **160** |
| ***Селезнев В.С.*** | Сейсмология – новые направления и проблемы | **163** |
| ***Чимитдоржиев Т.Н.*** | Спутниковая радиолокационная диагностика косейсмической динамики блоково-разломной структуры, криогенных и оползневых явлений | **166** |

## ВУЛКАНОЛОГИЯ, СЕЙСМОЛОГИЯ; ГОРНЫЕ НАУКИ, ГЕОЭКОЛОГИЯ

| | | |
|---|---|---|
| ***Кирюхин А.В.*** | Геотермофлюидомеханика гидротермальных и вулканических систем | **168** |
| ***Озеров А.Ю.*** | Генетическая модель извержений надсубдукционных базальт-андезибазальтовых вулканов | **171** |
| ***Корнилков С.В.*** | Системология и геотехнологические аспекты поддержания и развития сырьевой базы горно-металлургического комплекса | **174** |
| ***Левин Л.Ю.*** | Тепловой режим глубоких рудников: расчет, прогноз и управление | **176** |
| ***Соколов И.В.*** | Методологические основы стратегии и подземной геотехнологии при комбинированной разработке глубокозалегающих рудных месторождений | **179** |
| ***Александрова Т.Н.*** | Научно-технологические основы эффективных экологически безопасных процессов извлечения цветных и благородных металлов из минерального сырья различного генезиса | **182** |
| ***Брушков А.В.*** | Риски деградации вечной мерзлоты в России | **185** |

| | | |
|---|---|---|
| ***Васильев А.В.*** | Опыт снижения низкочастотного шума и вибрации сложных технических установок, в том числе горных машин. Теоретические основы экологического мониторинга загрязнения почвы нефтесодержащими отходами, мониторинга токсикологических загрязнений биосферы | **188** |
| ***Вознесенский Е.А.*** | Динамика грунтов – актуальное научное направление геоэкологии и инженерной геологии | **191** |
| ***Закиров Э.С.*** | Актуальные проблемы геоэкологии и рационального нефтегазового недропользования | **194** |
| ***Керимов И.А.*** | Геоэкологические проблемы ТЭК Северного Кавказа | **197** |
| ***Коробова Е.М.*** | Эколого-геохимические проблемы современной ноосферы. Подходы к решению и перспективы. | **200** |
| ***Лукичев С.В.*** | Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности | **202** |
| ***Макаров Д.В.*** | Обоснование технологий переработки отходов горных предприятий в условиях Арктической зоны на примере Мурманской области | **205** |
| ***Матвеев А.И.*** | Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых | **208** |
| ***Перминова И.В.*** | От молекулярных сигнатур антропоцена до экоадаптивных технологий жизнеобеспечения | **210** |
| ***Семячков А.И.*** | Геоэкологические исследования горнопромышленных комплексов | **213** |
| ***Татаринов В.Н.*** | Системный анализ устойчивости геологической среды при захоронении высокоактивных радиоактивныхотходов в геологических формациях | **215** |
| ***Хавкин А.Я.*** | Нефтегазовые нанотехнологии – важнейшее направление наук о Земле в области нефте-, газо- и угледобычи | **218** |

**Секция**

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОКЕАНОЛОГИИ, ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ И ГЕОГРАФИИ

## ГЕОГРАФИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ


| | | |
|---|---|---|
| ***Владимиров И.Н.*** | Объективность и новое качество географических знаний | **221** |
| ***Железняк М.Н.*** | Криолитозона Северо-Востока Азии. Состояние, прогноз и перспективы исследований | **224** |
| ***Зольников И.Д.*** | Палеогеографические обстановки морфолитогенеза, геоинформационное картографирование и прогнозное моделирование геосистем Западной Сибири | **227** |
| ***Новиков И.С.*** | Язык геоморфологических карт: алфавит и синтаксис | **230** |
| ***Барталев С.А.*** | Космическое картографирование и географические исследования растительного покрова России | **232** |
| ***Гашкина Н.А.*** | Формирование химического состава вод и биогеохимическая индикация качества вод | **235** |
| ***Дружинин А.Г.*** | Евразийские метаморфозы современной России: общественно-географический анализ | **238** |
| ***Колосов В.А.*** | Постсоветские непризнанные государства: факторы жизнеспособности и риски для России | **241** |
| ***Крюкова М.В.*** | Особенности эколого-географической структуры и антропогенной динамики растительного покрова муссонной области бассейна Амура | **244** |
| ***Макаров А.С.*** | Будущее высокоширотных дрейфующих исследований в Арктике | **246** |
| ***Мотовилов Ю.Г.*** | ECOMAG – платформа для региональных гидроэкологических исследований речных бассейнов | **248** |
| ***Панин А.В.*** | Флювиальная геоморфология и палеогидрология равнин Северной Евразии в конце четвертичного периода | **251** |
| ***Субетто Д.А.*** | Палимнологические исследования в России: современное состояние и перспективы | **254** |


## ОКЕАНОЛОГИЯ


| | | |
|---|---|---|
| ***Дударев О.В.*** | Восточно-арктический шельф – природный полигон для выявления характерных особенностей современного литоморфогенеза перегляциально-морской геосферы | **257** |
| ***Пранц С.В.*** | Лагранжева океанография | **259** |
| ***Зайцев А.И.*** | Развитие информационной системы прибрежных рисков, связанных с морскими природными катастрофами | **261** |
| ***Макаров Д.В.*** | Лучевой и волновой хаос в акустике океана | **262** |

| | | |
|---|---|---|
| ***Шакиров Р.Б.*** | Газогеохимические поля Мирового океана: фундаментальные и прикладные аспекты | **265** |
| ***Бердников С.В.*** | Базы данных, климатические атласы, спутниковые технологии и математические модели в изучении многолетних изменений в морских экосистемах | **268** |
| ***Гебрук А.В.*** | Гидротермальные экосистемы - глобальный взгляд и экологические проблемы | **269** |
| ***Ермаков С.А.*** | Отображение океанических процессов на водной поверхности и их многочастотная радиолокация: проблемы и перспективы | **271** |
| ***Иванов В.В.*** | Ускоренное сокращение арктического морского льда вследствие возрастания эффективности обратных связей в системе «океан-лёд-атмосфера» | **274** |
| ***Морозов Е.Г.*** | Глубинная циркуляция вод и внутренние волны | **277** |
| ***Носов М.А.*** | Волны цунами как проблема физики океана | **279** |
| ***Огородов С.А.*** | Рельефообразующая деятельность морских льдов | **282** |
| ***Репина И.А.*** | Взаимодействие океана и атмосферы при различных атмосферных стратификациях и в условиях неоднородной поверхности | **285** |
| ***Родионов А.А.*** | Фундаментальные и прикладные исследования в интересах освещения подводной обстановки, скрытности и защиты подводных объектов | **288** |
| ***Соков А.В.*** | Крупномасштабная циркуляция вод субполярной Северной Атлантики и ее климатическая изменчивость | **291** |
| ***Тараканов Р.Ю.*** | Аспекты исследования Глобального океанского конвейера: Южный океан и абиссальная циркуляция | **293** |
| ***Троицкая Ю.И.*** | Морские брызги при сильном ветре: механизмы генерации, статистические свойства и роль в динамике штормов | **296** |

## ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, КЛИМАТОЛОГИЯ

| | | |
|---|---|---|
| ***Головацкая Е.А.*** | Биогеохимический цикл углерода болотных экосистем Западной Сибири | **299** |
| ***Пташник И.В.*** | Водяной пар в радиационном балансе атмосферы. Континуальное поглощение водяного пара | **301** |
| ***Веселовский И.А.*** | Исследование атмосферного аэрозоля с использованием лидаров упругого, комбинационного и флуоресцентного рассеяния | **304** |
| ***Елисеев А.В.*** | Отклик Земной системы на естественные и антропогенные воздействия с анализом причинно-следственных связей | **306** |
| ***Куличков С.Н.*** | Акустическое зондирование анизотропной структуры атмосферы | **309** |

| | | |
|---|---|---|
| ***Семенов С.М.*** | Современное усиление парникового эффекта и потепление климата | **312** |
| ***Толстых М.А.*** | Применение глобальной модели атмосферы ПЛАВ в прогнозе погоды и воспроизведении современного климата | **314** |
| ***Фейгин А.М.*** | Нелинейно-динамические методы анализа и прогноза эволюции атмосферных и климатических систем | **316** |
| ***Чхетиани О.Г.*** | Турбулентность и структурные особенности атмосферной циркуляции | **319** |

## ГЕОИНФОРМАТИКА

| | | |
|---|---|---|
| ***Линник В.Г.*** | Геоинформатика и математическое моделирование в ландшафтной радиоэкологии | **322** |
| ***Лупян Е.А.*** | Разработка методов построения геоинформационных систем дистанционного мониторинга | **325** |
| ***Розенберг И.Н.*** | О решениях задач географического, картографического и геоинформационного обеспечения в интеллектуальных системах управления железнодорожным транспортом | **328** |
| ***Тикунов В.С.*** | Геоинформационное обеспечение характеристики здоровья населения как компоненты устойчивого развития регионов РФ | **330** |

# «ГЕОЛОГИЯ»

## ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ПРОЦЕССЫ СЕДИМЕНТАЦИИ В ПОЛЯРНОМ ОКЕАНЕ СЕЙЧАС И В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ

*А.Г. Матуль*

ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», *г. Москва*
amatul@mail.ru

Интерес к изучению геосферного состояния Арктики вызван проблемой *Arctic Amplification* – обнаружением в два–три раза бóльшей амплитуды однонаправленных природных изменений в полярных районах северного полушария по сравнению с умеренными и более низкими широтами Земли [1]. Седиментация в североевропейских и арктических морях выступает, по выражению академика А.П. Лисицына, природным самописцем современного и древнего климата. Поэтому анализ донных отложений служит вкладом геологии в исследование причин, хода и последствий глобальных природных изменений в полярной зоне.

Работы в Геологическом направлении ИО РАН развивают комплексный подход к анализу большого массива донных осадков из многочисленных экспедиционных сборов – сочетание литологического, микропалеонтологического, изотопного, геохимического методов с использованием современных технологий (оборудование и методика).

Вероятным двигателем *Arctic Amplification* является «атлантификация» – воздействие на Северный Ледовитый океан бóльшего притока и бóльшего теплозапаса соленых и относительно теплых атлантических водных масс из Североатлантического течения через Норвежское море. Это четко выражено в морях Российской Арктики. Но и воздействие тихоокеанской воды через Берингов пролив также увеличивается, особенно заметно на поверхности западной Арктики, приводя к изменениям геохимии (поставка силикатов), циркуляции (усиление течений у Канады) и стратификации (распреснение с поверхности). В целом, такие процессы меняют обитание и накопление в донных осадках породообразующих организмов (продуктивность и видовой состав), седиментацию в маргинальных осадочных фильтрах (усиление контакта речных и морских вод) и краевой ледовой зоне (расширение зоны осадочной разгрузки при таянии льда).

Работа в ИО РАН с донными осадками из полярной области ведется по двум направлениям: 1) отражение нынешней природной обстановки и ее изменений на шкале десятилетий в современных осадках, 2) долговременные тренды и возможная цикличность в развитии природной среды на шкале столетий/тысячелетий/десятков тысячелетий, запечатленные в разрезах четвертичных отложений. основная задача – распознать влияние потеплений и похолоданий как «кризисных факторов» на полярную природную среду и седиментацию.

Одним из последствий современного глобального потепления в арктических и субарктических районах и регионального океанографического сдвига с конца 1990-х гг. в Северной Атлантике считается вселение в фитопланктон и доминирование вида диатомей *Neodenticula seminae*, который является четвертичным и современным эндемиком субарктической Пацифики. Наши исследования проб поверхностного слоя осадков в морях Лабрадорском, Ирмингера и Норвежском [2] показали, что новый вид за ~20 лет смог заселить субарктическую Атлантику и Норвежско-Гренландский бассейн и больших количествах сохраниться в донных осадках. Видимо, резкие изменения климата и океанографии на шкале десятилетий могут четко фиксироваться в осадочных записях по основным микрофоссилиям, что важно учитывать при детализации палеореконструкций.

Наступление современных условий происходило в ходе неогляциации – похолодания с уровня 4–5 тыс. лет назад после термического оптимума голоцена. В СЗ части Северной Атлантики (колонка АИ-3359) и центре Норвежско-Гренландского бассейна (колонка PS1243-2) неогляциация, по нашим новым данным, четко проявилась в записях кремневых микрофоссилий по значительному уменьшению доли тепловодных диатомей и радиолярий. Однако похолодание происходило раньше на ~1 тыс. лет на поверхности, чем в подповерхностном слое, судя по реконструкции палеотемпературы по радиоляриям, что может быть вероятным признаком постепенного проявления (диахронности) изменений в вертикальном столбе воды. В Норвежском море в последние 2 тыс. лет неогляциация остановилась и наступило потепление, исходя из новых результатов по седиментологии и микропалеонтологии колонок АМК-5188 и АМК-6142 из Лофотенской котловины.

Яркий пример из недавнего геологического прошлого по перестройке экологических и седиментационных систем в Норвежско-Гренландском бассейне – резкий переход от плейстоценового оледенения к межледниковому голоцену 12–10 тыс. лет назад. На рисунке показаны сильные изменения всех параметров осадков на этом уровне. До него преобладало «пульсирующее» накопление крупнозернистого терригенного материала ледового разноса, а экосистема была мало меняющейся полярной. После этого материал ледового разноса исчез, крупнозернистый материал стал преимущественно биогенным (фораминиферы). Полярные условия сменились субполярными с переменным влиянием атлантических водных масс. Это потепление, скорее всего, не может быть аналогом современного, т.к. происходило в других «граничных» условиях (распад материкового оледенения). Поэтому дальнейшая работа должна быть сосредоточена на быстрых кратковременных потеплениях конца голоцена.

Поддержка работ ведется в рамках проекта РНФ № 21-17-00235 и темы Госзадания ИО РАН № 0128-2021-0006.

1. *Budyko M.I.* The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth // Tellus.1969. V. 21. P. 611–619.

2. *Matul A., Kazarina G.Kh.* The North Pacific Diatom Species Neodenticula seminae in the Modern and Holocene Sediments of the North Atlantic and Arctic // Geosciences. 2020. 10, 173; doi:10.3390/geosciences10050173.

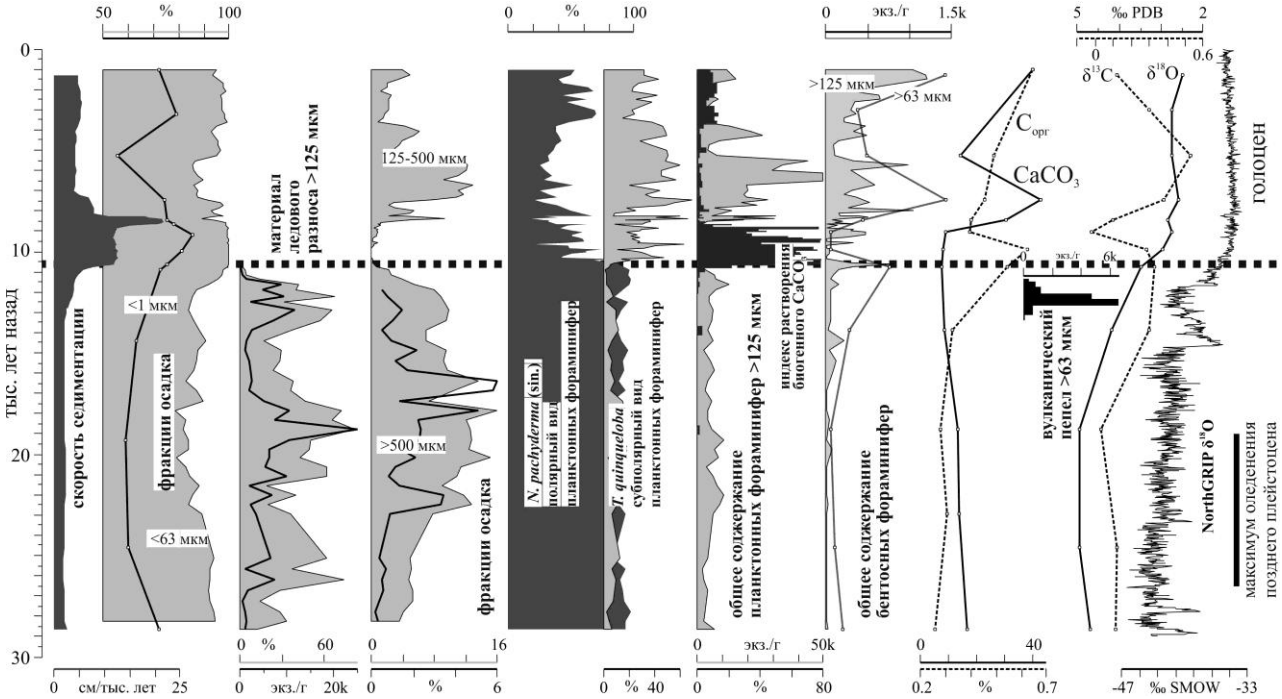



Рисунок. Записи седиментации и палеоклимата в колонке АМК-5188 из ЮЗ части Лофотенской котловины за последние 30 тыс. лет. Горизонтальная пунктирная линия обозначает уровень перехода к межледниковым условиям голоцена

# ОПОРНЫЕ РАЗРЕЗЫ МЕЛОВОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ

*Е.Ю. Барабошкин*

ФГБОУ ВО Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, *г. Москва*
barabosh@geol.msu.ru

В последние десятилетия происходит ревизия Международной (МСШ) и Общей (ОСШ) стратиграфических шкал, которая сопровождается поиском, обоснованием, и утверждением новых лимитотипов границ ярусов (GSSP, ТГСГ, «Точка глобального стратотипа границы»). Многие (но не все) ярусы меловой системы уже имеют утвержденные GSSP. Положение новых ярусных границ МСШ в большинстве случаев не отвечает традиционным представлениям, на которых базируются ОСШ и региональные (РСШ) стратиграфические шкалы. Для обоснования корреляции ОСШ, РСШ с МСШ и разработки нового отечественного каркаса меловой стратиграфии необходимо создание сети опорных разрезов, в которых обоснованы уровни GSSP, а также дополнительные уровни, обеспечивающие глобальную корреляцию.

Сложность проблемы состоит не только в необходимости комплексного подхода, но и в том, что обширная территория России охватывает, как минимум, четыре палеобиогеографических провинции, различавшихся условиями существования биот, а, следовательно, и самими руководящими фаунами и флорами. Очевидно, что решение проблемы связано именно с комплексным применением традиционных палеонтологических и пока еще нетрадиционных непалеонтологических методов (палеомагнитного, геохимического и др.), обеспечивающих изохронность корреляций.

Среди российских регионов, имеющих принципиальное значение для построения хроностратиграфического каркаса меловой системы, следует назвать, в первую очередь, Крым, Северный Кавказ и юг Русской плиты. Это связано с тем, что на территории нашей страны именно в Крымско-Северокавказском и Закаспийском палеобассейнах условия были наиболее близки к «тепловодным» условиям седиментации окраины океана Тетис, к которой принадлежат разрезы с выбранными GSSP (главным образом, юг Западной Европы). Как следствие, седиментологические (пелагическое карбонатное осадконакопление) и палеонтологические характеристики отложений меловой системы упомянутых регионов обнаруживают наибольшее сходство с европейскими разрезами, а комплексы ископаемой флоры и фауны, используемые в качестве глобальных маркеров стратиграфических границ, могут быть в них идентифицированы.

Примером, демонстрирующим подход к решению данной проблемы, является изучение сантон-маастрихтских отложений Крыма и Русской плиты, проводимое автором совместно с большой группой исследователей [1–4]. К настоящему моменту получены детальные и комплексные данные о двух десятках разрезов в Среднем и Нижнем Поволжье, Западном Казахстане, Юго-Западном Крыму. Основной целью исследований являлось прослеживание утвержденного уровня GSSP кампанского и маастрихтского ярусов, а также предложенного международной рабочей группой уровня для GSSP сантонского и кампанского ярусов. Изученные разрезы содержат представительные комплексы макро- и микробиоты; пригодны для получения палеомагнитных и геохимических (стабильные изотопы) данных, имеющих принципиальное значение для проведения изохронных межрегиональных корреляций.

Основными результатами проведенных работ являются: (1) идентификация рассматриваемых уровней GSSP, (2) определение диахронности, иногда значительной (порядка 1 млн. лет), палеонтологических видов-маркеров границ, (3) установление значительного эндемизма биот в разрезах соседних палеобиогеографических областей, приводящего к исчезновению видов-маркеров GSSP, (4) выявление скрытых перерывов вблизи уровней GSSP, (5) предложения фиксации подошвы кампанского яруса по основанию магнитного хрона 33r – маркеру, позволяющему наиболее точно синхронизировать ярусную границу в разных регионах. Наконец (6), по стратиграфической полноте пограничного интервала сантона–кампана, разнообразию палеонтологических остатков, возможности получения магнито- и хемостратиграфической характеристик, разрезы Юго-Западного Крыма не уступают существующим кандидатам в GSSP подошвы кампана. Он вполне могут претендовать на роль кандидатов в лимитотипы или дополнительных к лимитотипу разрезов.

**Выводы.** Таким образом, полученные материалы уже позволяют детально, с точностью до десятков сантиметров, трассировать изохронные уровни сантон-маастрихтских отложений от Крыма до Поволжья. Дальнейшей задачей является их прослеживание в разрезах Западной Сибири, Арктики, и других регионов России.

Опыт работ позволяет наметить несколько иной подход к фиксации важнейших стратиграфических границ по сравнению с GSSP, приматом которого является биостратиграфический метод. Предлагается устанавливать границы не просто по выбранным ископаемым видам-маркерам, но следует выбирать эти маркеры на- или вблизи уровней событий, определяемых непалеонтологическими методами (границы магнитных хронов и изотопные события), по которым и проводить границы. В этом случае мы получим надежный каркас стратиграфической шкалы, позволяющий проводить глобальную корреляцию, не зависящую от фаций и условий осадконакопления. Несомненно, что при этом требуется сеть опорных разрезов, для которых проведена подобная процедура. Какой статус придавать новым границам, следует ли считать разработанную таким образом шкалу национальной или пытаться ее как-то адаптировать к международной, – это вопросы, которые нуждаются в дальнейшем широком обсуждении.

1. *Барабошкин Е.Ю., Беньямовский В.Н., Гужиков А.Ю. и др.* Комплексное изучение пограничного интервала кампана / маастрихта в Поволжье (Россия) и на плато Актолагай (Западный Казахстан) Русской плиты. Проблемы геологии и расширение минерально-сырьевой базы стран Евразии. Материалы международной научной конференции / под ред. Г.Ж. Жолтаева. Алматы: ТОО «Институт геологических наук К.И. Сатпаева». 2019. С. 69–79.

2. *Барабошкин Е.Ю., Гужиков А.Ю., Александрова Г.Н. и др.* Новые седиментологические, магнитостратиграфические и палинологические данные по разрезу кампана–маастрихта горы Бешкош, Юго-Западный Крым // Стратигр. Геол. корреляция. 2020. Т. 28, № 6. С. 125–170.

3. *Гужиков А.Ю., Барабошкин Е.Ю., Александрова Г.Н. и др.* Био-, хемо- и магнитостратиграфия пограничного интервала сантона–кампана разрезов Кудрино и Аксу-Дере (Юго-Западный Крым): проблемы глобальной корреляции и выбора лимитотипа нижней границы кампанского яруса. Статья 1. Геологическое описание, седиментология, биостратиграфия // Стратигр. Геол. корреляция. 2021а. Т. 29, № 4. С. 71–117.

4. *Гужиков А.Ю., Барабошкин Е.Ю., Александрова Г.Н. и др.* 2021б. Био-, хемо- и магнитостратиграфия пограничного интервала сантона–кампана разрезов Кудрино и Аксу-Дере (Юго-Западный Крым): проблемы глобальной корреляции и выбора лимитотипа нижней границы кампанского яруса. Статья 2. Магнито- и хемостратиграфия, обсуждение данных // Стратигр. Геол. Корреляция. 2021б. Т. 29. № 5, С. 27–58.

# ПАЛЕОФЛОРИСТИКА, СТРАТИГРАФИЯ, ПАЛЕОКЛИМАТОЛОГИЯ, ФЛОРОГЕНЕЗ: НОВЫЕ МЕТОДЫ И НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*А.Б. Герман*

ФГБУН «Геологический институт РАН», *г. Москва*
alexeiherman@gmail.com

Палеоботаника, находясь на стыке наук о Земле и биологии, решает присущие обеим наукам задачи морфологии, анатомии, систематики и филогении древних растений, биостратиграфии, фитогеографии, палеофлористики, флорогенеза и палеоклиматологии.

Основой для разработки и детализации фитостратиграфии служит детальное изучение ископаемых растений. Поэтому автором было предпринято монографическое изучение ряд ключевых меловых флор Севера и Северо-Востока Азии, Аляски и Западной Европы, уточнены стратиграфическое положение и возраст этих флор, их систематический состав и этапность развития, описаны на современном методическом уровне ископаемые растения, составляющие древние флоры, в том числе новые таксоны – роды и виды.

Результаты перечисленных исследований нашли отражение в решении важных в теоретическом и практическом планах проблем биостратиграфии континентальных отложений указанных регионов: (1) на основе установления этапности развития древних флор были впервые разработаны детальные биостратиграфические схемы неморских альбских–палеоценовых отложений Анадырско-Корякского и Северо-Аляскинского субрегионов, а также Новосибирских островов; (2) рассмотрена сравнительная палеофлористика арктических регионов Азии и Аляски и проведена межрегиональная корреляция их флороносных отложений с другими отложениями Арктики; (3) было показано, что флоры Северной Пацифики пережили биотический кризис на границе мела и палеогена без существенных эволюционных последствий; (4) впервые был предложен сценарий альбского–позднемелового флорогенеза в Северной Пацифике, ведущая роль в котором принадлежала внедрению в мезофитные флоры продвинутых растительных сообществ с доминированием покрытосеменных, причем показано, что флорогенез имел также и свои региональные особенности. В соавторстве с коллегами из Великобритании был публикован он-лайновый каталог древних растений Арктики, озаглавленный «Ископаемые растения Арктики. Полярная растительность в мелу и палеогене», в котором содержится более 40 гигабайт информации по геологии, стратиграфии, палеофлористике, палеоклиматах и о меловых ископаемых растениях арктических регионов Азии и Аляски.

Помимо меловых палеоботаники и биостратиграфии, были изучены юрские флоры Монголии, уточнены их стратиграфическое положение, возраст и систематический состав, показаны палеофитогеографическое и палеоклиматическое значения этих древних флор.

Ископаемые растения дают бесценный материал для реконструкции древних климатов. В соавторстве с коллегами из США, Великобритании и Китая был разработан новый количественный палеоклиматических метод CLAMP, позволяющий по морфологии листьев ископаемых покрытосеменных рассчитывать параметры палеоклимата, в котором эти растения существовали: среднегодовую температуру, средние температуры наиболее теплого и холодного месяцев, продолжительность вегетационного периода, количество осадков за вегетационный период, среднемесячное количество осадков за вегетационный период, количество осадков за три последовательных наиболее влажных и сухих месяцев, влажность относительную, влажность удельную и энтальпию. Особенно важно то, что данный метод дает нам количественные характеристики палеоклиматов – температуры в градусах и осадков в мм, и позволяет количественно же оценить возможную ошибку метода.

С использованием метода CLAMP проанализирован позднемеловой «парниковый» климат арктических регионов Азии и Северной Америки и показано, что он был гумидным умеренным или умеренно-теплым с теплыми летними сезонами, мягкими зимами и незначительной сезонностью выпадения осадков (Cb, Cc по классификации Кеппена).

Анализ климатических параметров и вероятной фенологии древних растений позволил заключить, что крупные динозавры, жившие в Арктике в конце мелового периода, вынуждены были на зимние сезоны мигрировать на юг на расстояние не менее 1000–1200 км; размножаясь в Арктике в недостаточно теплые летние периоды, динозавры скорее всего прибегали к изощренным методам организации и содержания своих гнезд.

Меловая Арктика была теплой и влажной. Чтобы объяснить этот феномен, в соавторстве с британским коллегой Р. Спайсером была высказана (и опубликована в журнале Nature) гипотеза о том, что в позднем мелу Арктика «обогревалась» теплым морским течением, шедшим из низких широт в Арктический бассейн по Западному внутреннему проливу, существовавшему в то время на Североамериканском континенте.

Полученные расчетные параметры мелового «парникового» палеоклимата были использованы для тестирования современных климатических моделей общей циркуляции (GCM), применяемых при прогнозе будущих климатических изменений. Было показано, что в ряде случаев эти модели, даже наиболее совершенные, могут существенно недооценивать возможные изменения климата при его антропогенном потеплении в обозримом будущем, особенно во внутриконтинентальных регионах Азии.

Ископаемые растения впервые были использованы для решения двух интереснейших и взаимосвязанных проблем: истории поднятия Тибета и истории формирования современного Южноазиатского муссонного климата. Для этого (1) был предложен методический критерий распознавания муссонного палеоклимата и его разных типов по морфологическим признакам ископаемых листьев двудольных растений и (2) с использованием метода CLAMP был проанализирован ряд эоцен-олигоценовых флор Южной Азии и выявлены те из них, которые несут признаки своего существования в муссонном климате. В результате было показано, что спектры признаков листьев из эоцена и олигоцена Южного Китая и Северо-Западной Индии сходны с таковыми в растительности современного Индонезийско-Австралийского муссона, являющегося результатом сезонных миграций межтропической зоны конвергенции, и не обнаруживают сходства со спектрами в растительности Южноазиатского муссона. Образование же современного мощного Южноазиатского муссона скорее всего было связано с поднятием Гималаев выше Тибетского плато на высоту около 5 км в середине миоценовой эпохи.

Продолжение перечисленных исследований представляется перспективным, что в первую очередь касается (1) монографического изучения древних флор по макроостаткам, спорам и пыльце ископаемых растений; (2) комплексного применения фито-, магнито-, петро- и изотопной стратиграфии, что особенно важно для ревизии стратиграфии Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и детализации истории формирования осадочного чехла Арктики; (3) применения нейросетей для диагностики массовых геологических объектов; (4) изучения флорогенеза в меловой Арктике как динамики мезофитных и кайнофитных растительных сообществ; (5) совершенствования методики количественной реконструкции палеоклиматов по палеоботаническим данным; (6) детальных количественных реконструкций параметров меловых и кайнозойских палеоклиматов; (7) тестирования с использованием этих данных современных климатических моделей (GCM) в плане их пригодности и точности для прогнозирования антропогенного потепления климата Земли, его амплитуды, темпов и возможных последствий.

# СОЗДАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ, РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ, ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

*Н.А. Еремин*

ФГБУН «Институт проблем нефти и газа РАН», *г. Москва*
ermn@mail.ru

В XX веке началось активное использование математических методов искусственного интеллекта в науках о Земле для поиска скрытых закономерностей в Больших ГеоДанных, были заложены научные основы геомоделирования в условиях слабоструктурированных Больших ГеоДанных с применением методов искусственного интеллекта и опубликована монография «Моделирование месторождений углеводородов методами нечеткой логики» [1]. В рамках выполнения государственных заданий ФГБУ «Российская Академия Наук» в области фундаментальных, поисковых и прикладных исследований проводится создание энергоэффективных, ресурсосберегающих, импортозамещающих и экологически чистых технологий поиска, разведки и разработки месторождений углеводородов. Выполняя поручение Президента России В.В. Путина № Пр-225, по обращению президента РАН А.М. Сергеева Минэнерго России, институты отделений РАН, нефтегазовые компании и университеты представили 253 предложения по приоритетному направлению научно-технологического развития РФ «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработке углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии», которые были включены в проект комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Цифровая и геотехнологическая модернизация крупнейшего в мире Западно-Сибирского центра нефтегазовой добычи, переработки и химии». Механизм КНТП по словам В.В. Путина «позволил объединить возможности вузов, научных организаций, частного бизнеса и компаний с государственным участием, чтобы мы могли не только создавать, но и быстро внедрять новые технологии в соответствии со Стратегией научно-технологического развития России». Как отметил в своем письме В.В. Путину президент РАН Сергеев А.М. Российская академия наук заинтересована в совместной реализации с нефтегазовыми компаниями «поставленных целей в области развития нефтяной и газовой промышленности. Нефтегазовая наука, обеспечившая создание технологий цифровой модернизации нефтегазового комплекса, позволит продлить на десятилетия сроки эффективной эксплуатации гигантских нефтяных и газовых месторождений». По запросу Минпромторга России и ТПП России из поступивших предложений от институтов РАН для формирования КНТП были сформированы своды имеющихся разработок отечественного программного обеспечения и нефтегазовых технологий для замещения импортных разработок.

В рамках фундаментальных и поисковых работ был выявлен новый глубокий тектонический элемент – Северо-Кубанский прогиб, представленный осадочным комплексом нижнемезозойско-палеозойского; установлены в песчаных речных фациях отложений палео – Дона протяженные антиклинальные структуры палеозой-мезозойского возраста по которым можно ожидать открытия крупных месторождений; исследовано геологическое строение, стратиграфия и закономерности размещения зарубежных нефтяных и газовых месторождений в высоко ресурсных нефтегазоносных и потенциально нефтегазоносных бассейнах Аравийской, Мальтийской и Синайской плит, и опубликованы монографии («Особенности геологического строения и перспективы

нефтегазоносности территории Иордании» и «Геология и разработка месторождений Сирии»); созданы и внедрены методы моделирования сухого, влажного и сверхвлажного горения с применением методов искусственного интеллекта для разработки высоковязких нефтяных месторождений и битумов. Созданы научные основы управления освоением арктических месторождений углеводородов. Разработана концепция цифрового геологического мониторинга за нефтяными разливами на Арктическом шельфе с использованием оптоволоконных технологий, и отмеченная министром МЧС в качестве одной из важнейших научных работ выполненных в 2011 г. Создана стратегия цифровой модернизации нефтегазовой отрасли, которая была передана в Минэнерго России в 2020 г.

В рамках прикладных работ была создана прорывная система геоуправляемого освоения пермокарбоновой залежи арктического месторождения Приразломное с использованием сверхпротяженных высокодебитных горизонтальных и бионических скважин, представленная вниманию мировой общественности на 17 Мировом нефтяном конгрессе в Рио де Жанейро в 2002 гг, и введенного в разработку в суровых ледовых условиях в конце 2013 г. Впервые выявлено влияние типов геологических обстановок осадконакопления и литологических типов пород-коллекторов по более чем 3000 залежам на успешность функционирования месторождений углеводородов; разработан и внедрен метод литофациальной оценки начальных объемов и извлекаемых запасов углеводородов. В 2021 г. была завершена многолетняя прикладная работа в рамках Гранта Минобрнауки РФ по созданию уникального прототипа интеллектуальной системы предупреждения осложнений при строительстве скважин на море и на суше не имеющего аналога за рубежом [2, 3]. Интеллектуальная система позволяет спрогнозировать возможные осложнения так, чтобы буровая бригада смогла в режиме реального времени совершить своевременные действия по их полному предотвращению или же минимизации возможных последствий. Для осуществления таких прогнозов используются Большие геоданные со станций геолого-технологических измерений буровых станков, получаемые в реальном времени. Отличительной особенностью и достоинством интеллектуальной системы раннего предупреждения осложнений является реализация контура обратной связи на основе организации применения регрессионной модели прогнозирования параметров геолого-технологических исследований и их сравнительного анализа с оценками, полученными по реальным данным, что позволяет автоматически выделять отклонения от штатных режимов бурения, проводить оперативную разметку реально-временных данных и пересчет весовых коэффициентов нейросетевых моделей, см. рис. 1. Апробация прототипа интеллектуальной системы выявления и прогнозирования осложнений при бурении нефтяных и газовых скважин на основе применения искусственной нейронной сети с пошаговой адаптацией к конкретным геолого-геофизическим условиям на тестовых и реальных данных показала сходимость прогнозируемых и реальных данных (корреляция) для осложнений типа «прихват» и «поглощение» – 89%.

1. *Еремин Н.А.* Моделирование месторождений углеводородов методами нечеткой логики / Н.А. Еремин. Москва : Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 1994. 462 с. ISBN 5-02-001846-5.

2. Патент № 2745136 C1 Российская Федерация, МПК E21B 44/00, G06N 3/02, G05B 13/04. Автоматизированная система выявления и прогнозирования осложнений в процессе строительства нефтяных и газовых скважин : № 2020129671 : заявл. 08.09.2020 : опубл. 22.03.2021 / А.Н. Дмитриевский, Н.А. Еремин, А.Д. Черников [и др.. ; заявитель ФГБУН Институт проблем нефти и газа Российской академии наук.

3. Патент № 2745137 C1 Российская Федерация, МПК E21B 44/00, G06N 3/02, G05B 13/04. Автоматизированная система выявления и прогнозирования осложнений в процессе строительства нефтяных и газовых скважин: № 2020129673 : заявл. 08.09.2020 : опубл. 22.03.2021 / А.Н. Дмитриевский, Н.А. Еремин, А.Д. Черников, А.Г. Сбоев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук.

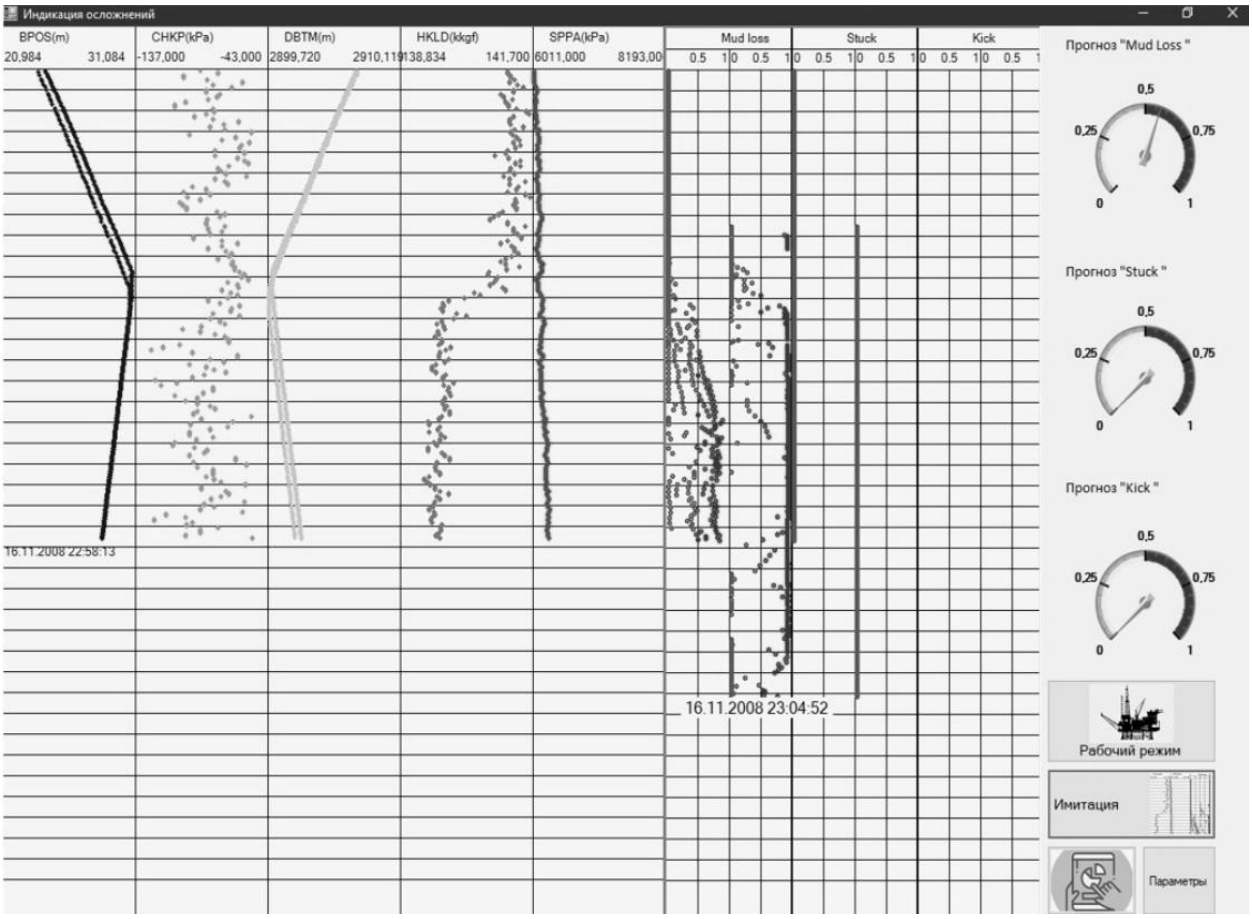



Рисунок. Панель мониторинга программного компонента «Обратная связь» созданного прототипа интеллектуальной системы предупреждения осложнений при строительстве скважин. Разработанный программный компонент «Обратная связь» выдает сообщение инженеру-бурильщику о возможном возникновении осложнения за 10–30 минут. При вероятности прогноза осложнения более чем 0.5 формируется рекомендация бурильщику, соответствующая данному осложнению. Для формирования рекомендаций бурильщику разработан алгоритм выбора рекомендаций из базы знаний, содержащейся в основном хранилище данных системы

# КОНТИНЕНТАЛЬНАЯ КОЛЛИЗИЯ И АНДЕРПЛЕЙТИНГ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

*В.С. Захаров*

ФГБОУ ВО Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, *г. Москва*
zakharov@geol.msu.ru

Коллизия – геодинамический режим, возникающий при столкновении блоков континентальной литосферы, Значительные различия в строении фанерозойских и докембрийских коллизионных орогенов, выявленные по геологическим данным отражают различия в стиле коллизионных процессов [1], которые могут быть воспроизведены и исследованы с применением численного геодинамического моделирования.

Для современных условий моделирование показывает, что в процессе коллизии формируется ороген, развиваются разрывы, надвиги и скучивание континентальной коры. Происходит погружение блоков коры (континентальная субдукция) и их последующая эксгумация, что приводит к внедрению эклогитов в коллизионный ороген. При погружении континентальной коры происходит ее прогрев и частичное плавление, развивается гранитоидный магматизм [2, 3, 4].

На поздних стадиях коллизии может происходить деламинация и откат погружающейся континентальной литосферной мантии и нижней коры, что приводит к андерплетингу (подъему под ороген частично расплавленной астеносферной мантии), и сопровождается базитовым магматизмом. Это дает возможное объяснение пространственному совмещению кислого коллизионного и базитового (траппового) магматизма в пределах Таймырской складчатой области [4]. При этом в недрах орогена модельные PT-условия в целом соответствуют наблюдаемой зональности метаморфизма Северного Таймыра [5].

Для исследования изменения стиля коллизии в истории Земли [2, 3, 6] при моделировании варьировались параметры, соответствующие геодинамическим условиям на более ранних этапах ее развития (превышение потенциальной температуры мантии над современными значениями $\Delta T_p$, мощность литосферы и др.). В позднедокембрийских условиях ($\Delta T_p$=50–100°C) в основном сохраняется стиль, характерный для современной коллизии [2]. Сопоставление результатов моделирования с геологическими данными показало, что фрагменты океанической коры, внедренные (интродуцированные) в метаморфизованные комплексы континентальной коры Северо-Восточного Таймыра в ходе позднедокембрийской коллизии, могут иметь двоякое происхождение: из первичной океанической коры (Челюскинский пояс) и из вновь образованной коры задугового бассейна (Становской пояс) [7].

В моделях, отвечающим раннедокембрийским ($\Delta T_p$>150°C) условиям, между континентами образуется не ороген, а крупная магматическая провинция [2, 3]. В условиях палеопротерозоя ($\Delta T_p$=130–150°C) континентальная субдукция реализуется в случае наличия базитовой нижней континентальной коры, но эксгумация эклогитов – эпизодическое событие, что объясняет редкие находки таких пород в докембрийских

орогенах [6]. В ходе коллизии в зоне орогена создаются условия для термовязкого перемагничивания пород [8], что важно при интерпретации палеомагнитных данных.

В случае принудительной коллизии относительно тонких континентальных плит в докембрийских условиях ($\Delta T_p$=150°C) формируется сначала «холодный», а затем «ультра-горячий» аккреционный ороген за счет деламинации и отката ее литосферной мантии с базитовой нижней корой [9]. К основанию орогена поднимается частично расплавленная астеносферная мантия (андерплейтинг), обеспечивающая разогрев его нижней коры. В состав орогена входят новообразованные метабазиты и метаосадки, дезинтегрированные блоки ранней коры и продукты плавления коры (ТТГ) и мантии.

Результаты численного моделирования андерплейтинга в сочетании с растяжением в докембрийских условиях ($\Delta T_p$ =150°C) дают возможное объяснение пространственному совмещению и последовательности формирования базитовых и кислых интрузивных тел палеопротерозойского Карельского кратона [10]. Воздействие мантийного плюма на начальных стадиях распада суперконтинента приводит к внедрению по ослабленным зонам в континентальную кору нескольких генераций базитовых интрузий, и затем в случае медленного (0.2–0.5 см/год) растяжения вызывает генерацию кислых интрузий, совмещенных с базитовыми. Также создаются условия для термовязкого перемагничивания пород в приконтактных зонах интрузивных тел.

Таким образом, численное моделирование является важным, а для докембрия – уникальным инструментом исследования геодинамических процессов.

1. *Sizova E., Gerya T., Brown M.* Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision // Gondwana Research. 2014. Vol. 25. P. 522–545.

2. *Захаров В.С., Перчук А.Л., Завьялов С.П. и др.* Суперкомпьютерное моделирование континентальной коллизии // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности (седьмой выпуск) / Под редакцией акад. В.А. Садовничего, акад. Г.И. Савина, чл.-корр. Вл.В. Воеводина. М.: Изд. Моск. ун-та, 2017. С. 71–80.

3. *Захаров В.С., Перчук А.Л., Завьялов С.П. и др.* Суперкомпьютерное моделирование континентальной коллизии в докембрии: эффект мощности литосферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 2. С. 3–9.

4. *Демина Л.И., Захаров В.С., Промыслова М.Ю., Завьялов С.П.* Соотношение коллизионного и траппового магматизма Таймыра: геологические данные и результаты суперкомпьютерного моделирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 1. С. 15–24.

5. *Демина Л.И., Захаров В.С., Промыслова М.Ю. и др.* Зональный метаморфизм Северного Таймыра по геолого-петрологическим данным и результатам компьютерного моделирования // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы LI Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2019. С. 177–181.

6. *Завьялов С.П., Захаров В.С.* Континентальная субдукция в палеопротерозое: условия и особенности протекания по результатам суперкомпьютерного моделирования // Бюлл. МОИП. Отдел геологический. 2016. Т.91. Вып. С.103–116.

7. *Демина Л.И., Захаров В.С., Промыслова М.Ю.* Внедрение Становских офиолитов Фаддеевского блока Северо-Восточного Таймыра по геологическим данным

и результатам численного моделирования // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4 Геология. 2022, № 1. С. 24–34.

8. *Лубнина Н.В., Захаров В.С., Новикова М.А., Воронцова В.П.* Палеопротерозойское перемагничивание в Беломорском подвижном поясе, Карелия: петро-палеомагнитные свидетельства и суперкомпьютерное моделирование // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 2. С. 10–21.

9. *Perchuk A.L., Safonov O.G., Smit C.A., van Reenen D.D., Zakharov V.S., Gerya T.V.* Precambrian ultra-hot orogenic factory: Making and reworking of continental crust // Tectonophysics. 2018. Vol. 746. P. 572–586.

10. *Zakharov V.S., Lubnina N.V., Stepanova A.V., Gerya T.V.* Simultaneous intruding of mafic and felsic magmas into the extending continental crust caused by mantle plume underplating: 2D magmatic-thermomechanical modeling and implications for the Paleoproterozoic Karelian Craton // Tectonophysics, 2022, Vol. 822. 229173.

# ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО СЕГМЕНТА ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА (ЦАСП)

*И.К .Козаков*

ФГБУН «Институт геологии и геохронологии докембрия РАН», *г. Санкт-Петербург*
ivan-kozakov@yandex.ru

*Ранний докембрий*. Полученные результаты геолого-геохронологических исследований дают основание для установления возрастных рубежей формирования раннедокембрийских комплексов в составе Байдарикского и Тарбагатайского террейнов ЦАСП. Ранее Байдарикский террейн включался в состав фундамента Дзабханского микроконтинента, рассматриваемого как раннедокембрийский. Позднее было показано, что раннедокембрийским является только Бумбугерский блок северо-западной части Байдарикского террейна. Становление структуры Бумбугерского блока определеляют постметаморфические граниты с возрастом 1825±5 млн лет (здесь и далее U-Pb метод по циркону, ID TIMS). В Бумбугерском блоке был выделен архейский (~2650 млн лет) байдарагинский комплекс и бумбугерский – раннепротерозойский. В развитии последнего установлено проявление регионального метаморфизма, достигающего уровня гранулитовой фации в интервалах около 2410–2360 и 1850–1860 млн лет [2, 5] Реконструкция возможного положения Бумбугерского блока в раннем протерозое, позволила сделать заключение о его близости Сино-Корейскому кратону, которое сохранилось с конца раннего протерозоя, когда они вошли в состав суперконтинента Колумбия до образования суперконтинента Родиния. Формирование тоналит-трондьемитовых гнейсов байдарагинского комплекса и метаморфизм гранулитовой фации происходили около 2650 и 2500 млн лет назад [2]. Присутствие в гнейсах бумбугерского комплекса цирконов с возрастом ~2500 млн лет показывает, что породы архейской нижней коры были размыты и становились источниками раннепротерозойской верхней коры, затем к рубежу ~2370 млн лет они снова перешли, но уже на уровень раннепротерозойской нижней коры [5].

*Ранний неопротерозой.* Докембрийские террейны Хангайской группы представляют собой структуры, сложенные тектоническими пластинами и блоками пород разного возраста, состава и происхождения. Присутствие в Дзабханском террейне пород островодужных комплексов, сформированных около 960–930 и 880–860 млн лет, предполагает проявление корообразующих процессов в палеоокеанической области в период относительно стабильного существования суперконтинента Родиния – 1000–860 млн лет [6]. С этим процессом связано исчезновение шельфов и удаление континентальных осадков в зоны субдукции. С периода около 860 млн лет в древних кратонах фиксируются процессы дивергенции, определяющие ранние стадии распада Родинии [1, 6]. В Дзабханском террейне в период 860–850 млн лет установлено формирование зрелой континентальной коры. В интервале 810–780 млн лет продолжалось развитие зон конвергенции, формирование континентальной коры террейнов Хангайской группы и ее сочленение с комплексами палеоокеанического бассейна. Предполагается существование субдуционнных зон в палеоокеанической области обрамления Родинии в конце мезопротерозоя–начале неопротерозоя [7].

*Поздний неопротерозой-ранний палеозой*. Большинство пород, связанных с метаморфизмом позднего неопротерозоя переработано в ходе становления метаморфизма раннего палеозоя, широко развитых в раннекаледонском обрамлении Восточно-Сибирской платформы 4]. Можно полагать, что они связаны с развитием

единой или сближенных зон конвергенции в пределах Палеоазиатского океана. Исключением является *Южно-Хангайский метаморфический пояс позднего венда (570–545 млн лет),* породы которого не вовлекались в метаморфические преобразования раннего палеозоя. Он установлен в сдвиговой зоне между Бумбугерским блоком Байдарикского террейна и офиолитами Баян-Хонгорской зоны, сформированными в интервале 665–577 млн лет. Завершение раннего эпизода метаморфизма (повышенного давления) в нем определяют дистенсодержащие пегматоидные граниты с возрастами 561±12 и 562±2 млн лет и граниты с возрастом 571 ± 9 млн лет; поздний эпизод метаморфизма (пониженного давления) происходил в интервале 550–540 млн лет. В нем выделены две толщи: метатерригенных пород и роговообманковых кристаллических сланцев (метавулканитов). В метавулканитах островодужной ассоциации нижнюю границу проявления метаморфизма фиксируют габброиды с возрастом 603±3 млн лет.

*Средний девон.* В Южно-Алтайском метаморфическом поясе представлены тектонические пластины, развитые вдоль склона Гобийского, Монгольского и Китайского Алтая и Восточном Казахстане. В них уровень метаморфизма достигал условий амфиболитовой и, местами, гранулитовой фации. Для пластин Алтая определен возрастной интервал позднего эпизода метаморфизма: 374±2 – 360±5 млн лет. В целом ранний эпизод метаморфизма пониженного давления, и поздний – повышенного, происходили в интервалах ~395–385 и 375–360 млн лет. Между ними установлена стадия стабилизации. Эти процессы происходили в ходе закрытия Южно-Монгольского океана. В структурах Китайского Алтая и Восточного Казахстана, установлена сходная последовательность процессов метаморфизма. С погружением спрединговогo хребта под активную окраину обрамления каледонского палеоконтинента связан перерыв в развитии субдукционной зоны в интервале около 380–375 млн лет и метаморфизма раннего эпизода, что фиксирует, внедрение роев даек базитов.

*Ранний мезозой.* В связи с закрытием Внутренне-Монгольского бассейна с океанической корой в интервале 230–220 млн лет сформирован Южно-Гобийский метаморфический пояс.

1. *Богданова С.В., Писаревский С.А., Ли Ч.Х.* Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 3. С. 29–45.

2. *Козаков И.К., Сальникова Е.Б. Вонг Т., Диденко А.Н. и др.* Кристаллические комплексы нижнего докембрия Дзабханского микроконтинента Центральной Азии: возраст, источники, тектоническая позиция // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2007. Т. 15. № 2. С. 3–24.

3. *Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Ковач В.П. Диденко А.Н., и др.* Формирование неопротерозойской континентальной коры в структурах центрального сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса //Петрология. 2021. Том 29. № 2. С. 55–65.

4. *И.К. Козаков, В.П. Ковач, Е.Б. Сальникова и др.* Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования метаморфических комплексов юго-западной части Тувино-Монгольского террейна, Центрально-Азиатский складчатый пояс // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2021. Том 29. № 4. С. 3–26.

5. *И.К. Козаков, Т.И. Кирнозова, М.М. Фугзан, Ю.В. Плоткина.* Этапы формирования раннепротерозойской нижней коры в структурах Центрально-Азиатского складчатого пояса. // Петрология. 2022. Том 30, № 2. С 124–139.

6. *Хераскова Т.Н., Буш В.А., Диденко А.Н., Самыгин С.Г.* Распад Родинии и ранние стадии развития Палеоазиатского океана // Геотектоника. 2010. № 1. С. 1–24.

7. *Ярмолюк В.В., Дегтярев К.Е.* Докембрийские террейны Центрально-Азиатского орогенного пояса: сравнительная характеристика, типизация и особенности тектонической эволюции. //Геотектоника. 2019. № 1. С. 3–43.

# ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ И ПРОБЛЕМЫ ЭВОЛЮЦИИ ДРЕВНЕЙШИХ КОМПЛЕКСОВ (на примере Кольского региона)

*Н.Е. Козлов*

Геологический институт ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН, *г. Апатиты*
kozlov.n.e@yandex.ru

Геология докембрия имеет свои особые черты, связанные со специфичностью этого периода, что определило в свое время появление направления – экзогенной геологии докембрия, в создании и развитии которого большую роль сыграл академик А.В. Сидоренко. Одной из основ данного направления является реконструкция первичной природы и геодинамических условий формирования протолитов супракрустальных комплексов. Здесь мы продолжаем работы, начатые А.Ф. Грачевым, Н.А. Домарацким, Н.Л. Добрецовым, В.А. Макрыгиной, А.Н. Нееловым, Дж.А. Пирсом, А.А. Предовским, О.М. Розеном, А.В. Сидоренко, А. Симоненом и многими другими.

Результаты многолетних исследований показали, что процессы эволюции Земли развивались нелинейно, о чем свидетельствует закономерное, статистически значимое отличие состава метабазальтов докембрия и базальтов фанерозоя [1, 2]. Мы полагаем, что при проведении параллелей между докембрийскими и фанерозойскими породными комплексами необходимо исходить из предположения о специфичности докембрийского периода развития планеты, с одной стороны, и некоторой общности в характере реализации геодинамических обстановок на всем протяжении геологической истории, с другой. Данный подход был сформулирован ранее [1] как положение о гомологичных рядах геодинамических режимов. Показано, что при намечающейся общности в реализации геодинамических обстановок докембрия и фанерозоя существует ряд различий, в связи с чем вместо использования прямых аналогий целесообразно выявлять родственные, гомологичные ряды, внося тем самым необходимые коррективы в актуалистический подход, не отвергая его. Это определило направление многолетних исследований – изучение эволюции докембрийских комплексов Кольского региона на основе данных о геологии и вещественном составе слагающих их породных ассоциаций.

Среди наиболее важных результатов таких исследований можно выделить следующие:

− Создание методов реконструкции условий формирования протолитов древнейших комплексов, позволяющих вводить поправку на химическую эволюцию вещества Земли и дающих возможность при проведении геодинамических реконструкций в докембрии более корректно оперировать понятием тенденций изменения режимов, не проводя полных аналогий с фанерозоем [1, 3, 4].

− Обоснование сходства режимов формирования высокобарных поясов Евразии с комплексами юных дуг фанерозоя (по 5]), что позволяет объяснить многообразие породных ассоциаций этих структур с позиции геодинамических обстановок в период формирования их протолитов 1, 6], а также проведение реконструкций возможного процесса корообразования на Европейской части Северо-Атлантического региона [2].

− Создание модели формирования и эволюции архейских комплексов Кольского региона. В ходе данного исследования были получены принципиально новые данные о геологической истории породных ассоциаций, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной СГ-3, Мурманского и Кейвского доменов [3, 4, 7, 8]. По петрогеохимическим характеристикам установлено, что при формировании древнейших породных ассоциаций

Кольского региона происходила смена геодинамических режимов, наиболее сходных с траппами, обстановками, более близкими к континентальным рифтогенным и, далее, островодужным. Аналогичное чередование плюмового и субдукционного магматизма, описано для более молодых комплексов центральной и восточной Арктики [9].

Изучение архейских породных ассоциаций Мурманского домена позволило уточнить взгляда академика Ф.П. Митрофанова на геологическое строение Кольского региона [10] и рассматривать этот домен в качестве фрагмента архейской глубоко эродированной гранит-зеленокаменной области.

Показано, что Кейвский домен сходен по режимам формирования со срединными массивами, что подтверждается находками в его пределах «аномально легкого» по изотопии углерода, источником которого мог быть водно-метановый флюид. Предложенная модель развития Кейвской структуры хорошо объясняет причины формирование в ее пределах гигантских по объемам месторождений алюминиевого сырья. Аналогично этому, формирование медно-никелевых руд Аллареченского района, железных руд Оленегорского рудного района, повышенные концентрации золота, серебра и т.д. в пределах Лапландского гранулитового пояса и Колмозеро-Вороньинской зоны хорошо укладывается в древнейшую историю их развития.

Таким образом, данные о геодинамической эволюции структурно-вещественных комплексов Кольского региона в сочетании с данными по металлогении позволяют говорить о том, что металлогенический прогноз на основе геодинамических реконструкций является перспективным направлением дальнейших исследований [3, 4]. Использованные методы показали также свою надежность и перспективность при изучении геологии древнейших комплексов горных пород.

1. *Козлов Н.Е.* Вещественный состав метаморфических комплексов высокобарных гранулитовых поясов и проблема формирования их протолитов (на примере Лапландских гранулитов). Автореферат докторск. дисс., С-Пб., ИГГД, 1995, 36 с.

2. *Козлов Н.Е., Мартынов Е.В., Иванов А.А.* Черты петрогеохимических различий основных пород энсиалических и энсиматических комплексов (сравнительный анализ фанерозоя и докембрия), Геохимия, №6, 1999, с.582–588.

3. *Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., и др.* Геология Архея балтийского щита. СПб.: Наука, 2006, 329 с.

4. Sorokhtin N.O., Kozlov N.E., Glaznev V.N., Martynov E.V. A Study in Earth's Geological Evolution (The Baltic Shield). Wiley. 2020. 588 p.

5. *Богатиков О.А., Цветков А.А.* Магматическая эволюция островных дуг. М.: Наука, 1988, 248 с.

6. *Kozlov N.E., Sorokhtin N.O., Martynov E.V.* Using Petrogeochemical Modeling to Understand the Relationship between Paleozoic Magmatism in the Kola Region and Its Precambrian History // Geosciences. 2020. 10(1). 11. DOI: 10.3390/geosciences10010011

7. *Kozlov N.E., Sorokhtin N.O., Martynov E.V.* Geodynamic Evolution and Metallogeny of Archaean Structural and Compositional Complexes in the North-western Russian Arctic // Minerals. 2018. 8(12). 573. DOI: 10.3390/min8120573

8. *Козлов Н.Е, Мартынов Е.В., Козлова Н.Е., Иванов А.А.* Петрогеохимические особенности метаморфитов геопространства Кольской СГ-3 как критерий выбора их в качестве гомологов глубинных пород (методологический аспект). // Геохимия, 2002, №6, с. 601–611.

9. *Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В., Кораго Е.А., Симонов В.А.* Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции центральной и восточной Арктики// Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 8, с. 1126—1144

10. *Mitrofanov F.P., Pozhilenko V.I., Smolkin V.F. et al.* Geology of Kola Peninsula. Apatity:KSC RAS, 1995. 145 p.

# ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ НЕОГЕЯ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ, ЕЕ ТИМАНСКОЙ, УРАЛЬСКОЙ И КРЫМСКО-КАВКАЗСКОЙ ПЕРИФЕРИИ

*Н.Б. Кузнецов*

ФГБУ «Геологический Институт РАН» *г. Москва*
kouznikbor@mail.ru

Для платформенных областей характерно двучленное (фундамент и чехол) строение верхних уровней земной коры. Этот класс структур выделен на рубеже XIX и XX в. на примере Восточно-Европейской платформы (**ВЕП**) А.П. Карпинским, Э. Огом и Э. Зюсом. В 20–30-х г.г. XX в. А.Д. Архангельский предложил различать древние платформы и молодые платформы (**МП**), противопоставляя их складчатым поясам. В частности А.Д. Архангельский и Н.С. Шатский отмечали, что **ВЕП** окаймлена складчатым поясами каледонид Скандинавии, герцинид Урала, киммерид и альпид Крыма и Кавказа. В настоящее время эти складчатые пояса правильнее понимать как выступы фундамента **МП**, обрамляющих **ВЕП**: эпигренвильской Свеко-Норвежской, эпитиманской Тимано-Печорско-Южно-Баренцевоморской, эпикаледонских Скандинавской и Северопольско-Уэльской, эпигерцинских Чешско-Иберийской, Скифско-Туранской, Урало-Западно-Сибирской, вовлеченной в синальпийское горообразование южной части эпигерцинской Скифско-Туранской и эпикиммерийской Горнокрымско-Туапсинской **МП**, а также осадочных бассейнов (**ОБ**) на альпийском «фундаменте». В литературе известны многочисленные, часто противоречивые и даже не редко исключающие друг друга модели палеогеографии и палеотектоники **ОБ ВЕП** и **МП** на ее периферии.

Развитие локальных методов U-Pb датирования зёрен детритового циркона (**dZr**) дает возможность тестировать/модернизировать региональные и субглобальные палеогеографические и палеотектонические модели, а иногда и предложить их новые варианты. Ниже приведен ряд авторских примеров модернизации и создания новых моделей эволюции **ОБ**, реликты которых расположены на **ВЕП** и на сопряженных **МП**.

**I.** Анализ датировок **dZr** из песчаников верхнего докембрия и нижнего палеозоя севера Русской плиты позволил тестировать конкурирующие более 20 лет модели, происхождения Тиманского орогена. В модели **TAMB** (***T****imanian* ***A****ctive* ***M****argin of* ***B****altica*) – это аккреционный поздненеопротерозойский ороген на окраине Балтики. В модели **ABC** (***A****rctida-****B****altica* ***C****ollision*) ороген сформирован в кембрии при коллизии Балтики и Арктиды [1, 5, 6]. Анализ датировок **dZr** показал, что продуктов эрозии орогена Тиманид в чехле **ВЕП** до среднего кембрия нет. Из этого следует: (1) Мезенский **ОБ** сложен продуктами эрозии фундамента **ВЕП** и Свеконорвежской области, т.е. Тиманская окраина Балтики была пассивной; (2) Тиманский ороген – результат коллизии Арктиды и Балтики, произошедшей между 540 и 510 млн лет.

**II.** Датировки **dZr** из песчаников верхнего докембрия и нижнего палеозоя Полярного Урала позволили установить (1) энсиалическую природу Малоуральского островодужного сооружения и задуговую природу офиолитов Войкарского массива, (2) временные рубежи тектонических и палеогеографических перестроек **ОБ**, реликты которых сохранены в структуре западного сегмента Полярного Урала [2].

**III.** Результаты датирования ***dZr*** из песчаников верхневендской ашинской серии (запад Ю.Урала) показывают, что эти песчаники сложены продуктами эрозии «***небалтийского***» происхождения. Высокое сходство возрастных наборов ***dZr*** из ашинских песчаников и близко одновозрастных им песчаников Квинслена (СВ Австралия) могут означать, что в Родинии Уральский край Балтики мог быть расположен рядом с Квинслендским краем Австралии [8]. Это фактически означает положительный тест модели Родинии в версии **AUD** (**A**ustralia **U**p-side **D**own).

**IV.** Анализ возрастов **dZr** из песчаников позднедокембрийско-палеозойских толщ запада Южного Урала [3, 8, 10], сформированных в длительно (почти 1.5 млрд лет) развивавшемся Восточно-Башкирском **ОБ**, позволяет показать смену этапов его эволюции и положения областей эрозии. Кварцевые песчаники рифея и нижнего девона (эмса) содержат продукты размыва комплексов Волго-Уральской части фундамента **ВЕП**. Полимиктовые песчаники верхнего венда и кварцевые песчаники ордовика содержат «***небалтийский***» детрит. Сероцветные каменноугольные и нижнепермские полимиктовые песчаники сложены продуктами эрозии орогена Уралид. Красноцветные верхнепермские полимиктовые песчаники содержат мезопротерозойский ***dZr***, рециклированный из верхневендских ашинских песчаников.

**V.** Анализ возрастных наборов ***dZr*** из красноцветных песчаников верхней перми запада Южного Урала и Московской синеклизы, а также из песчаников нижнепалеогеновой части разреза Новороссийского флиша (район г. Туапсе) показал сходство этих наборов. Это означает, что продукты эрозии герцинского орогена Уралид в поздней перми достигли центральных районов **ВЕП**, а оттуда в мезозое и кайнозое были транспортированы к северной окраине Тетиса. Это, в числе прочего, означает, что в раннем кайнозое орогена Большого Кавказа не было.

**VI.** Анализ возрастных наборов зёрен ***dZr*** из ордовикских толщ разных зон Урала показал наличие «провенанс-сигнала», характерного для Пери-Гондванских блоков Западной и Центральной Европы, Карпат, Добруджи, Балкан, Анатолид, Понтид, Большого Кавказа и Закавказья. Это означает, что пояс Пери-Гондванских блоков прослеживается в самые восточные зоны Южного Урала [3].

**VII.** Анализ возрастных наборов зёрен ***dZr*** из песчаников таврической серии Крыма позволил разработать новую модель эволюции Таврического **ОБ** и структур, сопряженных с ним с севера [4, 9]. Суть этой модели. (1) В позднем триасе в мелководном Скифском **ОБ** на южном краю Евразии шло накопление терригенно-глинисто-карбонатных толщ, в сопряженном со Скифском **ОБ** с юга глубоководном Таврическом **ОБ** в условиях верхней части континентального склона шло накопление низов разреза эскиординской серии, а в нижней части континентального склона и у его подножья – нижнетаврической свиты. (2) В ранней юре на месте Скифского **ОБ** возникло поднятие Добруджа-Крым. Оно, во-первых, преградило путь продуктам эрозии Евразии в Таврический **ОБ**, а, во-вторых, стало источником детрита для аккумулированных в этом **ОБ** песчаников верхнетаврической свиты.

Таким образом, U-Pb датирование зёрен **dZr** и содержательная интерпретация результатов сравнения получаемых возрастных наборов стали обычными инструментами научных геологических исследований, позволяющими тестировать палеогеографические и тектонические гипотезы и модели эволюции **ОБ ВЕП** и спряженных с ней **МП**, а также предлагать новые варианты этих гипотез и моделей.

1. *Кузнецов Н.Б.* // Диссертация на соискание уч. ст. докт. геол.-мин. наук. 2009.
2. *Кузнецов Н.Б.*, Романюк Т.В. // Б. МОИП, отд. геолог. 2014. Т.89. В.5. С. 56–70.
3. *Кузнецов Н.Б.,* Романюк Т.В. // Геотектоника. 2021. №4. С. 3–40.
4. *Кузнецов Н.Б. и др.* // Стратиграфия. Геол. корр. 2022. Т. 30. №4. С. 3–2.
5. *Kuznetsov N.B. et al.* // Gondwana Research. 2007. V.2. Is.3. P. 305–323.
6. *Kuznetsov N.B. et al.* // Gondwana Research. 2010. V.17. Is.2–3. P. 583–601.
7. *Kuznetsov N.B. et al.* // International Geol. Review. 2014a. V.56. #16. P. 1945–1963
8. *Kuznetsov N.B. et al.* // Precambrian Research. 2014 b. V.244. P. 288–305.
9. *Kuznetsov N.B. et al.* // Int. Journal of Earth Sci. 2019. V.108, Is.7, P. 2407–2428.
10. *Kuznetsov N.B. et al.* // Geol. and Geo-Environ. Proceses on Earth. 2021. P. 7–24.

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ АНТАРКТИКИ

*Г.Л. Лейченков*

ФГБУ «ВНИИ Океангеология», *г. Санкт-Петербург*
german_l@mail.ru

Антарктика представляет собой крупную область Земли, расположенную к югу от 60° ю.ш., и включает континент Антарктиду, площадью около 14 млн. кв. км, и южные части Атлантического, Индийского и Тихого океанов, объединяемые в Южный океан. Антарктида почти полностью (более чем на 99%) скрыта под толстым слоем льда, достигающего местами 4–5 км, и поэтому существенную роль в изучении её геологического строения играют геофизические методы, хотя прямые геологические наблюдения в горных районах материка имеет первостепенное значение, являясь основой для выявления основных вещественных комплексов земной коры, реконструкции истории её геодинамического развития и интерпретации геофизических данных.

Систематические геолого-геофизические исследования Антарктики начались в период Международного геофизического года (1957/58 гг.) и с тех регулярно выполняются экспедициями многих стран, членов Договора об Антарктике. Координация научных исследований осуществляется Научным комитетом по изучению Антарктики (СКАР), который является тематической организацией Международного научного совета и состоит из постоянно действующих научных групп, сформированных по основным направлениям научной деятельности.

По результатам многолетних геологических исследований выявлены основные тектонические провинции Антарктиды. В надлёдных выходах фундамента, сосредоточенных в прибрежной зоне Восточной Антарктиды, распознаются две главные категории докембрийских структур: архейские-палеопротерозойские ядра древней стабилизации земной коры (кратоны) и мезопротерозойские-неопротерозойские подвижные пояса (орогены). Установлено активное проявление тектонической деятельности в раннем палеозое, которое одними специалистами рассматривается как орогения, завершившая становление Гондваны, а другими, как внутриплитная тектоно-магматическая активизация [1]. Горно-складчатые сооружения Трансантарктических гор и Западной Антарктиды являются компонентами Тихоокеанского подвижного пояса, включающего несколько кулисообразно расположенных и разнородных по строению, протяженности и времени формирования складчатых систем и зон, последовательно омолаживающихся в направлении тихоокеанского побережья [1].

Представления о тектоническом строении подлёдной территории Антарктиды преимущественно основано на интерпретации геофизических материалов. Наиболее информативными являются данные аэромагнитных съёмок, которые выполнялись разными странами. Анализ аномального магнитного поля позволяет выделить границы кратонов и орогенов. Уникальная информация о тектоническом строении центральной Антарктиды получена благодаря исследованиям мелких (до 5 мм) обломков горных пород, обнаруженных в кернах базальной части льда скважины на станции Восток [2]. В результате этих исследований, подкрепленных геофизическими данными, достаточно надежно установлено, что в районе станции развиты мезопротерозойские орогенные комплексы и позднепротерозойские молассы.

На основании интерпретации морских геофизических данных определены главные тектонические Южного океана, разработаны модели ранней истории распада Гондваны,

выявлены обстановки осадконакопления и изменения природной среды в геологическом прошлом. Пассивная континентальная окраина Восточной Антарктиды и прилегающие океаны формировалась в результате рифтогенеза и последующего распада Гондваны (разделения Африки, Индии и Австралии от Антарктиды) на протяжении позднего мезозоя-кайнозоя. В составе осадочного чехла окраинных бассейнов выделяется рифтовый и пострифтовый структурные этажи. Верхнюю часть пострифтового этажа занимает уверенно диагностируемая толща, формировавшаяся под влиянием антарктического оледенения на протяжении 34 млн. лет. На основе анализа сейсмических фаций и темпов седиментации выявлены обстановки накопления осадков и изменения природной среды Антарктики.

Для решения многих научных проблем, связанных с геологией Антарктики, Научным комитетом по изучению Антарктики были разработаны международные проекты в рамках которых объединяются интеллектуальные, финансовые, производственные и организационные ресурсы; создаются объединённые информационные базы данных. К числу этих проектов относятся: «Магнитная карта Антарктики» (ADMAP), «Топография подлёдного ложа Антарктики» (BEDMAP), «Батиметрическая карта Южного океана» (IBCSO), «Корреляция геофизики и геологии» (CGG), «Мерзлота, почвы и перигляциальные обстановки Антарктики» (ANTPASS) и др.

В последние годы приоритетным направлением антарктических исследований является изучение изменений природной среды, климата, динамики ледникового покрова и уровня моря в геологическом прошлом [3]. Понимание механизмов, которые управляли климатом, объёмом льда и уровнем Мирового океана, в свою очередь, необходимо для более точного моделирование будущих изменений природной среды. На решение этих проблем были нацелены амбициозные международные научно-исследовательские программы, выполняемые научными коллективами многих стран и организаций: «Эволюция антарктического климата» (ACE, 2000–2010 гг.) и Антарктические ледниковые покровы прошлого (PAIS, 2011–2020 гг.). С 2021 г. их продолжила программа «Ледовый покров Антарктики и критические условия, влияющие на его стабильность» (NSTANT), направленная на изучение вклада антарктического ледникового покрова в Мировой океан.

Геолого-геофизические исследования являются важной составляющей этих программ, так как для моделирования климата и динамики ледникового покрова необходима информация о подлёдном субстрате (геологическом строении коренного ложа материка), тепловом потоке, палеотопографии, источниках сноса, обстановках седиментации, развитии ледниковых форм рельефа на антарктических шельфах. Все эти задачи успешно решаются в результате международного сотрудничества и реализации научных проектов и программ СКАР. Одним из важнейших результатов этого сотрудничества стала коллективная монография «Эволюция антарктического климата», которая представляет собой уникальный труд, основанный на многолетних исследованиях по приоритетным программам СКАР и суммирующий современные знания об изменениях природной среды и климата южной полярной области Земли в кайнозойское время [4].

1. *Grikurov G.E., Leychenkov G.* Tectonic Map of Antarctica (Scale 1:10 M). Commission for Geological Map of the World (CGMW). Paris, 2012. 1 sheet.

2. *Leitchenkov G., Antonov A., Luneov P., Lipenkov V.* Geology and environments of subglacial Lake Vostok // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. Vol. 374, 20140303.

3. *Лейченков Г.Л.* Изменения климата и природной среды Антарктики в геологическом прошлом // Лед и снег. 2014. № 4. С. 107–116.

4. Antarctic climate Evolution. 2-nd Edition. Elsevier. 2022. 787 p.

# ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ ПОРОД: ОТ ГЛОБАЛЬНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ ДО РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

*Н.В. Лубнина*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*

natalia.lubnina@gmail.com

Перемагничивание традиционно рассматривается как фактор, ограничивающий использование палеомагнитного метода для геотектонических реконструкций. Вместе с тем, перемагничивание несет информацию о тектоно-термальной эволюции магматических и метаморфических комплексов, интерпретация которой позволяет создавать научные основы геодинамических и металлогенических региональных реконструкций, в том числе для прогноза месторождений полезных ископаемых.

Установление причин и геодинамических условий, определяющих неоднократное перемагничивание пород, и выявление возможных факторов, приводящих к избирательной записи этих событий докембрийскими комплексами, является актуальной научной задачей.

Традиционно под перемагничиванием пород подразумевается процесс, который частично или полностью «затушевывает» первичную компоненту намагниченности в результате воздействия трех основных агентов: температуры, давления и гидротермальных флюидов. В зависимости от сочетания P–T режимов традиционно различают термовязкое и химическое перемагничивание. Вместе с тем, присутствие в породах некоторого количества органического вещества, позволяет выделить третий тип перемагничивания – органическое.

Обычно при палеомагнитных исследованиях выделяют метахронную компоненту, вторичную природу которой доказывают на основании тестов палеомагнитной надежности. Активное развитие изотопных методов сделало возможным датировать различные наложенные процессы. В частности, U–Pb датирование циркона, сфена, монацита и рутила из полиметаморфических комплексов позволяет определить возраст и реконструировать последовательность и условия метаморфических преобразований.

В многочисленных публикациях показано, что различные по составу породы, содержащие различные минералы-носители намагниченности, могут перемагничиваться по-разному [1 и ссылки в этой работе]. Верно и обратное утверждение – магнитные минералы в разных по составу (кислые ↔ основные) и генезису (магматические ↔ осадочные) породах при одинаковых условиях чаще всего перемагничиваются по-разному.

Согласно [2] механизмы химического перемагничивания возможно разделить на две группы: изменения, вызванные влиянием флюидов, и изменения, связанные с процессом диагенеза. Движение флюида часто связывается с орогенезом, по [3] этот механизм характерен для многих примеров остаточного химического намагничивания (CRM).

Для понимания процессов химического перемагничивания совместно с А.Ю. Бычковым (МГУ имени М.В. Ломоносова) в 2018 году была разработана и изготовлена уникальная установка, позволяющая проводить эксперименты по взаимодействию вода-порода в регулируемом магнитном поле при температуре до 450 °C и давлении до 1 кбар. Изучение образцов до и после эксперимента позволило

установить образование вторичного однодоменного магнетита в образцах оливинитов и габброноритов. В образцах же высокомагнезиальных габброноритов однодоменный магнетит возникает только при длительном (30 суток) воздействии рассола хлорида натрия с концентрацией 20%. Установлены два процесса образования однодоменного магнетита: (1) серпентинизация оливина и пироксена и (2) преобразование титаномагнетита в титанит и магнетит.

Изучение образцов позволило выявить несколько факторов, способствующих химическому перемагничиванию за счет образования вторичного однодоменного магнетита: (1) минеральный состав породы и (2) концентрация хлорида натрия в растворе. В высококонцентрированных растворах образование магнетита происходит быстрее. С увеличением температуры и давления скорость образования магнетита возрастает. Скорость образования магнетита в образцах оливинитов и пироксенитов пропорциональна квадратному корню от времени, что соответствует модели диффузионного контроля метасоматических реакций.

Лабораторные эксперименты позволили по-новому оценить сохранность первичность компонент намагниченности в докембрийских комплексах Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса. Помимо выделяемых традиционно этапов перемагничивания 2.45 и 1.98 млрд. лет [4], впервые восстановлены направления, этапность и продолжительность этапов перемагничивания 2.1−1.9, 1.73−1.70 и 1.62−1.60 млрд. лет.

Проведенное тестирование совпадения палеопротерозойских палеомагнитных полюсов, рассчитанных со вторичных разновозрастных компонент намагниченности и референтных фанерозойских полюсов Восточно-Европейского кратона показало, что частичное совпадение докембрийских полюсов Карельского кратона и палеозойских полюсов Восточно-Европейского кратона вызвано не «повторяемостью» событий, а некорректным разделением вторичных палеопротерозойских компонент намагниченности химической природы.

Проведенные в Западной Арктике комплексные петромагнитные исследования позволили выделить три этапа палеозойского-кайнозойского перемагничивания пород Определено пространственное распределение разновозрастного перемагничивания и масштабов его проявления и построена серия мезо−кайнозойских реконструкций с учетом разновозрастного перемагничивания в Западной части Российской Арктики. Актуализированы палеозойские и мезозойские реконструкции Восточно-Европейской платформы с учетом разновозрастного перемагничивания.

1. *Zwing A., Clauer N., Liewig N., Bachtadse V.* Identification of remagnetization processes in Paleozoic sedimentary rocks of the northeast Rhenish Massif in Germany by K/Ar dating and REE tracing of authigenic illite and Fe oxides // Journal of Geophysical Research. 2009. 114 p.

2. *Elmore, R.D., Muxworthy, A.R., Aldana, M.M. & Mena, M.* (eds) 2012. Remagnetization and Chemical Alteration of Sedimentary Rocks. Geological Society, London, Special Publications, 371, 1–21.

3. *McCabe, C. & Elmore, R.D.* 1989. The occurrence and origin of Late Paleozoic remagnetization in the sedimentary rocks of North America. Reviews of Geophysics, 27, 471–493.

4. *Mertanen S., Vuollo, J.I., Huhma, H. et al.* Early Paleoproterozoic-Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield-New paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations // Precambr. Res. 2006. Vol. 144. P. 239–260.

# ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ И ФОРМИРОВАНИЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИИ В МЕЗОЗОЕ-КАЙНОЗОЕ

*М.В.Лучицкая*

ФГБУН «Геологический институт РАН», *г. Москва*
luchitskaya@ginras.ru

Анализ мезозойско-кайнозойских тектоно-магматических событий северного обрамления Тихого океана и тектонической эволюции континентальной окраины Северо-Востока Азии позволяет выделить доаккреционные, аккреционные и постаккреционные группы гранитоидов.

Доаккреционные гранитоиды участвуют в строении террейнов различноой геодинамической природы, а именно входят в состав вулкано-плутонических ассоциаций внутриокеанических островных дуг или надсубдукционных офиолитовых комплексов. Они представлены породами низкоглиноземистой ТТГ ассоциации (кварцевыми диоритами, тоналитами, трондьемитами), относятся к толеитовой и известково-щелочной сериям, имеют надсубдукционные характеристики и соответствуют I (M)-типу гранитов. Происхождение доаккреционных гранитоидов связано либо с дифференциацией базитовой магмы, либо с частичным плавлением ранее сформированных пород основного и среднего состава. Изотопные данные указывают на первично мантийный характер источника гранитоидных магм. Доаккреционный гранитоидный магматизм, обеспечивающий формирование корового слоя средне-кислого состава внутриокеанических островных дуг, фиксирует начало становления гранитно-метаморфического слоя будущей континентальной коры. Примерами гранитоидов данного типа являются плагиогранитные комплексы полуострова Тайгонос, входящие в состав надсубдукционных офиолитов в аккреционной призме Удско-Мургальской островной дуги, Западно-Корякская складчатая система, и полуострова Камчатский мыс, сформированные в основании Кроноцкой внутриокеанической дуги, Корякско-Камчатская складчатая система.

Аккреционные гранитоиды Корякии, Чукотки, Камчатки фиксируют крупные фазы вхождения террейнов в структуру континентальной окраины и приурочены к ее фронтальной части. Термин «аккреционный магматизм» был первоначально предложен для плагиогранитных комплексов покровно-складчатых структур восточной части Корякского нагорья в пределах Корякско-Камчатской складчатой области. Для них отмечается четкая временная и структурная приуроченность к этапам аккреции океанических комплексов Палеопацифики в средней юре и середине мела.

К группе аккреционных гранитоидов относятся синкинематические интрузии плагиогранитов Ганальского хребта Камчатки, Корякско-Камчатская складчатая область. Они маркируют этап тектонического совмещения океанических и островодужных комплексов на рубеже позднего мела – палеогена, которое сопровождалось образованием складчатых, надвиговых структур и метаморфизмом. В Пекульнейском сегменте Западно-Корякской складчатой системы становление аккреционных гранитоидов происходило во фронтальной части позднеюрско-раннемеловой островной дуги синхронно с аккрецией океанических комплексов во время субдукции и островодужного магматизма в раннем мелу. В Срединном хребте Камчатки, Корякско-Камчатская складчатая область, выделяются два этапа гранитного магматизма. Кампанский этап связан с аккреционной обстановкой на Камчатской окраине Евразии, выплавление гранитоидов вероятно

происходило в результате поступления мафических расплавов в основании аккреционной призмы. Раннеэоценовый этап гранитного магматизма является следствием коллизии Ачайваям-Валагинской внутриокеанической островной дуги с Камчатской окраиной Евразии. Аномально быстрый прогрев коры и выплавление гранитоидов были связаны с подъемом астеносферных масс в результате отрыва погруженной под Ачайваям-Валагинскую дугу части литосферной Евразиатской плиты.

Аккреционные гранитоиды имеют разнообразные геохимические характеристики, которые определяются особенностями состава комплексов аккреционных призм, подвергающихся частичному плавлению, могут иметь сходство с гранитами Кордильерского S-типа. Изотопные данные указывают на два компонента в источнике магм (осадочное вещество аккреционной призмы и базальты срединно-океанических хребтов). Аккреционный гранитоидный магматизм приводит к формированию ювенильной континентальной коры и наращиванию гранитно-метаморфического слоя.

К моделям происхождения аккреционного типа магматизма можно отнести: погружение в зону субдукции океанической коры большой мощности и повышенной плавучести или океанического хребта, а также плавление амфиболитов или метаграувакк в зоне субдукции на небольших глубинах. Аккреционный гранитоидный магматизм имеет черты сходства с адакитовым магматизмом в отношении структурной позиции, состава продуктов магматизма и моделей происхождения.

Постаккреционные гранитоиды входят в состав вулкано-плутонических ассоциаций окраинно-континентальных вулканических поясов. Гранитоиды запечатывают покровно-складчатые структуры и определяют верхний возрастной предел времени аккреции, деформации и становления континентальной коры. Гранитоиды принадлежат известково-щелочной и высоко-калиевой известково-щелочной серии, имеют надсубдукционные характеристики и сходство с Кордильерским I-типом гранитов. Изотопные данные указывают как на мантийный, так и на коровый характер протолита. Гранитоиды окраинно-континентальных поясов меняют свой состав от раннего этапа их развития (I-тип) к позднему этапу (S- и A-типы). Постаккреционный гранитоидный магматизм окраинно-континентальных поясов связан с переплавлением гетерогенной аккреционно-островодужной коры и фиксирует определенный (более «зрелый») этап становления континентальной коры.

Становление континентальной коры на активной окраине Азиатского континента происходило в результате взаимодействия тектонических и магматических процессов в рамках представлений о континентальной аккреции. В тектонической эволюции складчатых поясов и континентальных окраин установлены многоэтапность и последовательность формирования гранитно-метаморфических слоев. Так, в Восточной Арктике выделены неопротерозойский (750–550 млн лет), девонско–раннекаменноугольный (390–350 млн лет) и раннемеловой (117–105 млн лет) основные этапы гранитоидного магматизма и их связь соответственно с байкальской (тиманской), элсмирской и позднекиммерийской фазами орогенеза.

Тектонические процессы обеспечивают многократное аккретирование разнообразных террейнов с ювенильной корой, что создает наращивание континентальной массы и увеличение мощности коры.

Магматический процесс, ведущая роль в котором принадлежит гранитоидному магматизму, в сочетании с метаморфическими преобразованиями и дифференциацией вещества определяет становление на активной окраине гранитно-метаморфического слоя земной коры.

Доаккреционные, аккреционные и постаккреционные гранитоидные комплексы характеризуют различные стадии формирования континентальной коры, и последовательность их проявления отражает последовательность и многостадийность процесса континентообразования.

# ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ ВНУТРИПОРОВЫХ МЕЖФАЗНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ИЗУЧЕНИЕ И ОСВОЕНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

*Н.Н. Михайлов*

ФГБУН «Институт проблем нефти и газа РАН», *г. Москва*
folko200@mail.ru

Современная нефтегазо-промысловая геология использует стандартные подходы к геофизическим исследованиям, к изучению кернового материала и моделированию залежей. Как правило, при изучении и разведке залежей углеводородов не учитываются межфазные и внутрипоровые взаимодействия пород и флюидов, и это приводит к ошибочным результатам.

Многофакторность и сложность внутрипоровых взаимодействий делают невозможным формальный перенос результатов фундаментальных работ по межфазным явлениям на внутрипоровое пространство коллекторов нефти и газа в целом. С этим связан неудовлетворительный уровень проработки проблемы.

Внутрипоровые взаимодействия происходят на огромных площадях межфазных поверхностей раздела, и по этой причине контролируют процессы фильтрации в коллекторах нефти и газа. Актуальность освоения трудноизвлекаемых запасов в нетрадиционных коллекторах кратно увеличивает потребность в изучении проблемы.

Экспериментальные и теоретические исследования автора доказали, что внутрипоровые межфазные взаимодействия существенно влияют на результаты лабораторного анализа керна, геофизические исследования скважин, моделирование залежей и технологические процессы их эксплуатации. Установлены новые эффекты и явления

− поражения пласта (изменения минерального состава и структуры внутрипорового пространства в процессах длительной фильтрации, приводящие к необратимым изменениям природных физических свойств);

− эффекты динамической структуры и подвижности остаточной нефти в заводнённых пластах (супер-трудноизвлекаемых запасов);

− нелинейный характер зависимости фазовой проницаемости от градиента давления в низкопроницаемых коллекторах;

− масштабный эффект (влияние размеров изучаемого кернового материала на значения определяемых физических свойств);

− специфическая смачиваемость нефтегазовых пластовых систем.

Эффекты поражения пласта проявляются в техногенной трансформации внутрипоровой структуры при длительной фильтрации нефти и воды, это приводит к снижению проницаемости по этим флюидам. Выявлены геолого-физические факторы, приводящие к снижению проницаемости и получены обобщённые зависимости кинетики поражения. Поражение пласта локализуется в околоскважинной зоне, что требует специального учёта при геофизических и гидродинамических исследованиях скважин [1].

Супер-трудноизвлекаемые запасы остаточной нефти требуют принципиально новых подходов к оценке этих запасов и обоснования технологий их извлечения. Автором

обоснованы механизмы и режимы образования остаточной нефти и выявлена её структура. Определены критерии мобилизации остаточной нефти в зависимости от технологического воздействия [2, 3].

Влияние масштабных эффектов на результаты лабораторных исследований керна проявляются в зависимости от действующих межфазных явлений, доминирующих на разных масштабных уровнях. Определены количественные характеристики микро- и макроструктуры пласта коллектора, ответственные за проявление масштабных эффектов. Установлена взаимосвязь масштабного эффекта и элементарного представительного объёма [4].

Смачиваемость нефтегазовых пластовых систем определяется комплексом межфазных явлений и геологических процессов формирования и трансформации залежей углеводородов. Обоснован новый тип смачиваемости коллекторов нефти и газа – микроструктурная смачиваемость, связанная с геометрией порового пространства и условиями миграции и аккумуляции углеводородов в залежи. Обоснованы геологические и физико-химические условия формирования микроструктурной смачиваемости [5, 6, 7].

Автором разработаны способы учёта внутрипоровых межфазных взаимодействий:

- при определении фильтрационно-ёмкостных свойств сложнопостроенных коллекторов по результатам лабораторного исследования керна:
- геофизическим данным;
- при оценке углеводородоотдачи пласта, при создании геологических и фильтрационных моделей залежи.

1. *Михайлов Н.Н.* Остаточное нефтенасыщение разрабатываемых пластов. – Москва, Изд-во Недра, 1992, 240 с.

2. *Михайлов Н.Н.* Информационно-технологическая геодинамика околоскважинных зон пласта, Москва, Изд-во Недра, 1996, 360 с.

3. *Михайлов Н.Н., Ермилов О.М., Сечина Л.С.* Адсорбционно-связанная нефть газоконденсатных месторождений // Геология и геофизика, 2016, т. 57, № 6, С. 1213–1224.

4. *Михайлов Н.Н., Ермилов О.М., Гурбатова И.П., Мелехин С.В.* Влияние масштабного фактора на мобилизацию остаточной нефти в лабораторном эксперименте // Доклады академии наук, 2016, т. 470, № 2, С. 189–193.

5. *Михайлов Н.Н., Ермилов О.М., Сечина Л. С.* Влияние асфальтенов на смачиваемость газонефтенасыщенных пород-коллекторов // Доклады академии наук, 2019, Т. 486, № 1, С. 65–68.

6. *Михайлов Н.Н. , Ермилов О.М., Михайлов А.Н.* Капиллярные концевые эффекты в коллекторах с гетерогенным типом смачиваемости // Доклады российской академии наук. Науки о Земле, 2020, т. 494, № 1, с. 20–24.

7. *Михайлов Н.Н., Ермилов О. М., Сечина Л. С., Меньшикова Д. С.* Влияние компонентного состава адсорбированной нефти на микроструктурную смачиваемость карбонатных коллекторов // Доклады российской академии наук. Науки о Земле, 2021, Т. 496, № 2, с. 122–127.

# ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

*А.М. Никишин*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*
nikishin@geol.msu.ru

Арктический океан включает Евразийский и Амеразийский бассейны, разделенные хребтом Ломоносова. Амеразийский бассейн делится на Южный и Северный домены. Южный домен – это Канадский бассейн. Северный домен – это система поднятий Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны Подводников, Макарова, Толля, Менделеева, Наутилуса, Стефанссона и др. Существует много нерешенных проблем строения и истории формирования Арктического океана. Среди них отметим принципиально важные вопросы: (1) соотношение времени формирования структур Южного и Северного доменов Амеразийского бассейна; (2) формировались ли структуры Северного домена синхронно или в какой-то последовательности; (3) какова была геометрия раскрытия Евразийского бассейна; (4) климатическая история данного региона.

Для решения данных и других проблем нами интерпретированы все сейсмические профили экспедиций Арктика-2011, Арктика-2012, Арктика-2014 и Арктика-2020, отработанные, прежде всего, в транзитных и глубоководных областях Арктического океана, и многие федеральные профили для территории шельфа. Также были использованы все открытые канадские и американские сейсмические профили. Мы изучили геофизические данные и данные по геологии Арктических островов и сопряженных континентов. Основным итогом явилась разработка единой схемы сейсмостратиграфии и стратиграфии района Арктического океана и разработка атласа тектонических, палеогеографических и палеотектонических карт [1, 2, 3, 4, 5]. Для кинематических реконструкций использовалась программа G-Plates.

В результате выполненных работ мы выделяем три основных стадии раскрытия Арктического океана: 133–125 Ма – раскрытие Канадского бассейна с океанической корой и корой переходного типа; (2) 125–80 Ма – синхронное формирование рифтово-вулканического поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов с сильно растянутой континентальной корой (бассейны Подводников, Макарова(?), Толля, Менделеева, Наутилус(?), Северо-Чукотского; (3) 56–0 Ма – формирование Евразийского бассейна.

Поднятие Альфа-Менделеева формировалось в апте-альбе как континентальный рифтово-вулканический пояс в условиях мелкого моря и вулканических островов. Бассейны типа Подводников также формировались в апте-альбе в условиях сильного растяжения и постоянно углубляющегося морского бассейна. Для этого региона типичны полуграбены, частично похожие на внутренние SDRs (seaward dipping reflectors) пассивных континентальных окраин; полуграбены выполнены базальтами с возрастами 125–100 Ма. В низах коры с разной степенью вероятности выделяется высокоскоростная нижняя кора. Это свидетельствует о большом количестве базальтовых интрузий в низах коры.

Для южной части Евразийского бассейна у моря Лаптевых на его континентальных окраинах нами по данным интерпретации сейсмических разрезов выделено много вероятных вулканов и интрузий с возрастами около 56 Ма. Из этого следует, что на юге Евразийского бассейна, вероятно, имеется вулканическая пассивная континентальная

окраина; для окраин такого типа характерна широкая зона с сильно растянутой континентальной корой. Интерпретация сейсмических данных указывает на отсутствие протяженного Хатангского-Ломоносовского трансформного разлома, который предполагался многими исследователями. Новые данные указывают, что Евразийский бассейн раскрывался по модели клина, с проградацией на юг в сторону моря Лаптевых. При этом правосдвиговые смещения возможны вдоль отдельных разломов ССВ простирания, что фиксируется по небольшим структурам типа пулл-апарт, выделенных на шельфе моря Лаптевых.

По результатам интерпретации сейсмических данных нами на поднятии Менделеева прогнозируются мелководные карбонатные постройки с возрастами 56–45 Ма. Глубины океана в этих местах составляют около 1,5 км. Это означает, что быстрое погружение поднятия Менделеева началось только с середины эоцена (около 45 Ма). Начало погружения бассейнов Подводников и Толля началось существенно ранее, около 100 Ма. Выявление палеоценовых карбонатов в Арктике существенно меняют представления о палеоклимате в этом регионе.

Современные данные позволяют нам разрабатывать новую модель тектонической и геодинамической истории Арктического океана. Основные результаты работ опубликованы в виде серии статей в ведущих журналах мира [1, 2, 3, 4, 5].

1. *Nikishin, A.M., Gaina, C., Petrov, E.I., Malyshev, N.A., Freiman, S.I.* Eurasia Basin and Gakkel Ridge, Arctic Ocean: Crustal asymmetry, ultra-slow spreading and continental rifting revealed by new seismic data// Tectonophysics, 2018, 746, 64–82.

2. *Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Korniychuk, A.V., Morozov, A.F., Petrov, O.V., Poselov, V.A., Beziazykov, A.V., Skolotnev, S.G., Malyshev, N.A., Verzhbitsky, V.E., Posamentier, H.W., Freiman, S.I., Rodina, E.A., Startseva, K.F., Zhukov, N.N.* Arctic Ocean Mega Project: Paper 1 – Data collection// Earth-Science Reviews. 2021a, 217, 103559.

3. *Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Freiman, S.I., Malyshev, N.A., Morozov, A.F., Posamentier, H.W., Verzhbitsky, V.E., Zhukov, N.N., Startseva, K.F., Rodina, E.A.* Arctic Ocean Mega Project: Paper 2 – Arctic stratigraphy and regional tectonic structure// Earth-Science Reviews. 2021b, 217, 103581.

4. *Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Freiman, S.I., Malyshev, N.A., Morozov, A.F., Posamentier, H.W., Verzhbitsky, V.E., Zhukov, N.N., Startseva, K.F.* Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 – Mesozoic to Cenozoic geological evolution// Earth-Science Reviews. 2021 c, 217. 103034.

5. *Nikishin A,M., Rodina E.A., Startseva K.F., Foulger G.R., Posamentier H., Afanasenkov A.P.,_Beziazykov A.V., Chernykh A.A., Malyshev N.A., Petrov E.I., Skolotnev S.G., Verzhbitsky V.E., Yakovenko I.V.* Alpha-Mendeleev Rise, Arctic Ocean: A double volcanic passive margin// Gondwana Research, 2022 (under review).

# ВНУТРИПЛИТНЫЙ МАГМАТИЗМ КАК ИНДИКАТОР ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ КРУПНЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ БЛОКОВ

*А.А. Носова*

ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН», *г. Москва*
nosova@igem.ru

Кратоны – наиболее древние и стабильные блоки континентальной литосферы. Именно в них сосредоточены самые разнообразные проявления магматизма, в том числе самые экзотические – кимберлитов и карбонатитов.

Магматизм кратонов, включая его геохронологические, геологические, изотопно-геохимические и петрологические характеристики, – является важнейшим источником информации о тектонической эволюции коры и литосферной мантии, в том числе о таких аспектах как стабилизация и модификация литосферы, формирование мантийных доменов и их связь с коровыми террейнами.

Важнейшими вопросами в исследованиях кратонного магматизма являются: что служит геодинамическим механизмом, ответственным за проявление внутриплитного континентального магматизма – подъем плюма или относительное движение плит? Насколько проявления внутриплитного магматизма независимы от геологических событий вблизи и на краях континентальной плиты? Каким образом предшествующие магматические эпизоды модифицируют литосферу кратонов и как это влияет на последующее магматические проявления?

В настоящем докладе будут рассмотрены геохронология, ключевые особенности состава, в том числе геохимические и изотопно-геохимические, модели формирования и геодинамический контекст магматических эпизодов, проявившихся в позднем докембрии и фанерозое на Восточно-Европейской платформе (ВЕП). Особый акцент будет сделан на информативность щелочно-ультраосновного магматизма в отношении геодинамической природы эпизодов модификация литосферы на примере Сибирской и Восточно-Европейской платформ.

ВЕП состоит из 3-х субкратонов, окончательное сочленение которых в единый континентальный блок произошло около 1.8 млрд. лет назад [1]. В позднем докембрии ВЕП развивалась как единый континентальный блок, входивший в мезопротерозое в суперконтинент Колумбия и в неопротерозое – в суперконтинент Родиния.

Наиболее ранним проявлением мезопротерозойского магматизма 1.6–1.55 млрд. лет. на северо-западе ВЕП стала анортозит-рапакивигранитная (AMCG) ассоциация, имеющая посторогенную природу. Следующий эпизод анортозит-рапакивигранитного магматизма 1.44–1.46 млрд. лет назад (Данополонская провинция) имел внутриплитную природу. Исследования этого магматизма в Ладожском грабене показали, что утоненная литосфера и проработанные пути транспортировки магматических расплавов обеспечивают поступление высоко-Ti ферробазальтов и их глубокую дифференциацию по феннеровскому тренду вплоть до появления несмесимости расплавов. Литосфера западных доменов ВЕП в мезопротерозое испытала тектоно-термальное событие около 1.4 млрд. лет, связанное с далополонской орогенией, как показало изучение цирконов из нижнекоровых ксенолитов в девонских щелочных базальтах Припятского прогиба.

Для Западно-Уральской (Машакской) крупной магматической провинции с возрастом около 1.38–1.35 млрд. лет на основании оценок составов и условий генерации первичных базальтовых и пикритовых расплавов, доказана плюмовая природа магматизма и установлены два разноглубинных мантийных источника расплавов. Зональное распределение в пределах провинции производных плавления этих источников связано с существованием литосферной ступени под ней. Эти события сопряжены с началом распада суперконтинента Колумбия. Окончательный распад этого суперконтинента фиксирует проявление щелочно-ультраосновного магматизма 1.2 млрд. лет в Западной Карелии (Костомукша-Лентиира), для которого мы показали принадлежность к оранжеитам. Предложена модель формирования источника расплавов в основании литосферы в ходе орогенных событий около 1.9–1.8 млрд. лет и его плавления при подъеме астеносферы 1.2 млрд. лет.

В неопротерозое (1.0–0.54 млрд. лет) внутриплитный магматизм ВЕП проявился в два этапа, ~750 –650 млн. лет на севере и востоке платформы и ~ 630–570 млн. лет по всем окраинам ВЕП; он был связан с распадом суперконтинента Родинии. Геохронологические исследования позволили впервые определить возраст магматизма Волынской провинции на западе ВЕП и возраст базальтов на севере ВЕП (Солозеро), и показать, что первый связан с раскрытием океана Япетус, а магматизм севера синхронен неопротерозойскому магматизму Западного Урала, связанному с пассивной окраиной Палеоазиатского океана. Изотопно-геохимические различия внутриплитного магматизма на западе по сравнению с севером и востоком ВЕП указывают на геохимически обогащенную литосферную мантию в первом случае и деплетированную литосферу – во втором.

Обнаружение на ВЕП магматизма раннекембрийского возраста позволило показать, что этот период развития платформы, который ранее рассматривался как амагматичный, характеризуется проявлениями внутриплитного и посторогенного магматизма, которые служат индикатором воздействия на литосферную мантию ВЕП коллизии со Скифией и другими восточно-авалонскими/кадомскими террейнами.

На основе изучения разновозрастных проявлений щелочно-ультраосновного магматизма на ВЕП, в том числе древнейших палеопротерозойских кимберлитов Кимозера, мезопротерозойских лампроитов Костомукши, девонских кимберлитов Архангельской провинции и лампрофиров Кольской провинции, были установлены его основные этапы и расшифрованы геодинамические обстановки. Для Архангельской кимберлитовой провинции на основании Rb-Sr изотопного датирования установлены два магматических эпизода, причем только поздний включал формирование промышленно-алмазоностных кимберлитов. Детальные исследования девонских вулканитов Припятского прогиба позволили внести изменения и дополнения в стратиграфическую схему девонских отложений Беларуси.

Геохронологические и Sr-Nd-Pb изотопные данные для щелочных и щелочно-ультраосновных пород Кольской провинции и кимберлитов Архангельской провинции показали синхронность магматических эпизодов, и переход от кимберлитовых к лампрофировым и карбонатитовым проявлениям посредством континуума составов, что указывает на общность процессов формирования провинций, которые могли быть инициированы относительным движением плит.

Открытие девонских лампрофиров и карбонатитов на юго-западе Сибирского кратона дало прямые свидетельства проявлений девонского щелочно-ультраосновного магматизма в этой области кратона, где ранее они предполагались только по косвенным признакам. Их изучение показало связь лампрофирового магматизма с посторогенными каледонскими событиями на юге кратона. Сравнительные исследования девонских

и триасовых (Чадобецское проявление) лампрофиров, показали, что воздействие сибирских траппов на границе перми и триасса привело к истощению мантийной литосферы юго-запада Сибирского кратона в отношении флюид-содержащих метасоматических фаз (флогопита) и замещению их карбронат-содержащими ассоциациями.

1. *Bogdanova, S.V., Gorbatschev, R., Garetsky, R.G.,* 2016. Europe/East European Craton.Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, pp. 1–18.

# РЕЖИМЫ ДОКЕМБРИЙСКОЙ СУБДУКЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*А.Л. Перчук*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*
ФГБУН «Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН, *г. Черноголовка*
alp@geol.msu.ru

Субдукция – важнейшая составляющая тектоники плит, во многом определяющая эндогенную активность современной Земли. Время возникновения субдукции и ее режимы на разных стадиях развития планеты остаются дискуссионными. Главные неопределенности связаны с влиянием повышенной температуры мантии и весьма ограниченными геологическими данными о ранней Земле [1].

Численное моделирование является эффективным методом изучения субдукционных процессов при разных потенциальных температурах мантии [2, 3], хорошо коррелируемых с возрастом остывающей Земли [1]. Отметим, что с помощью численного моделирования обычно не удавалось получить полноценную субдукцию в архее из-за размягчения плит, вызванного небольшой мощностью литосферы и частичным плавлением мантии при повышенных температурах (например, [4, 5]). Ниже рассматриваются результаты численного моделирования, меняющие эти представления и показывающие исключительно важную роль деплетирования мантийных пород в геодинамике докембрийских плит, участвующих в субдукции.

В первой серии численных экспериментов [6] нами изучался механизм образования мантийных килей под кратонами. Для этого проводилось 2-D моделирование интраокеанической субдукции с последующей континентальной субдукцией при повышенных температурах мантии (выше, чем современная потенциальная температура мантии на $\Delta T$=150–250$^{o}$C). При моделировании учитывались фазовые превращения, плавление в различных литологических типах пород, а также деплетирование мантии. Моделирование впервые показало, что мощный деплетированный мантийный слой под литосферой способен отделяться от субдуцирующей плиты, перемещаясь в результате вязкого течения под континентальную литосферу (рис.1 а–б). Так образуются вязкие андерплейты, которые устанавливаются в мантийных килях под кратонами независимым образом с помощью метода химической томографии. Моделирование показывает, что описанный процесс мог происходить только в докембрийских условиях при повышенных температурах мантии, соответствующих возрастам субкратонной мантии. Размещение тугоплавкого и относительно легкого слоя мантии под континентами способствует их стабилизации в виде кратонов, а последующее кондуктивное остывание не затронутой конвекцией субкратонной мантии создает мантийные кили и благоприятные термодинамические условия для образования алмазов (рис. 1 с).

Во второй серии численных экспериментов [7] исследовалось влияние потенциальной температуры мантии на режимы интраокеанической субдукции. Моделирование показало, что субдукция действует во всем диапазоне температур, изменяясь от двустороннего режима при $\Delta T$=250$^{o}$C (соответствует архею) до одностороннего при более низких температурах мантии. Двусторонняя субдукция приводит к образованию мощных коллизионных террейнов мощностью до 300 км,

которые состоят в основном из метабазитов, образованных по породам океанической коры. Прекращение субдукции приводит к термальной релаксации и частичному плавлению глубинных частей террейнов – это новый механизм образования гранитоидов ТТГ формации в раннем докембрии. Односторонняя субдукция образует магматические островные дуги с задуговыми бассейнами или без них. Оба режима субдукции приводят к значительному увеличению количества деплетированных перидотитов в верхней мантии при ΔT=200–250 °C, которые в силу малой плотности отслаиваются от субдуцирующей плиты и накапливаются в верхней мантии. Аномально высокое деплетирование мантии сейчас фиксируется преимущественно в ее древнейших частях – перидотитах мантийных килей под кратонами.

Исследования выполнялись при финансовой поддержке грантов РФФИ 16-05-00495 и 20-05-00329.

1. Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества. Отв. ред. М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолюк. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2021. 329 с.

2. *Gerya T.* Numerical modeling of subduction: State of the art and future directions: Geosphere, 2022. https://doi.org/10.1130/GES02416.1.

3. *Perchuk A.L., Safonov O.G., Smit C.A., van Reenen D.D., Zakharov V.S., Gerya T.V.* Precambrian ultra-hot orogenic factory: Making and reworking of continental crust // Tectonophysics, 2018. Vol. 746. P. 572–586.

4. *Sizova E., Gerya T., Brown M., Perchuk L.L.* Subduction styles in the Precambrian: insight from numerical experiments // Lithos, 2010. Vol. 116. P. 209–229.

5. *Perchuk A.L., Zakharov V.S., Gerya T.V., Brown M.* Hotter mantle but colder subduction in the Precambrian: what are the implications?// Precambrian Research, 2019. Vol. 330. P. 20–34.

6. *Perchuk A.L., Gerya T.V., Zakharov V.S., Griffin W. L.* Building cratonic keels in Precambrian plate tectonics // Nature, 2020. Vol. 586. P. 395–401.

7. *Perchuk A.L., Gerya T.V., Zakharov V.S., Griffin W. L.* Depletion of the upper mantle by convergent tectonics in the Early Earth // Scientific Reports, 2021. Vol. 11, 21489. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00837-y.

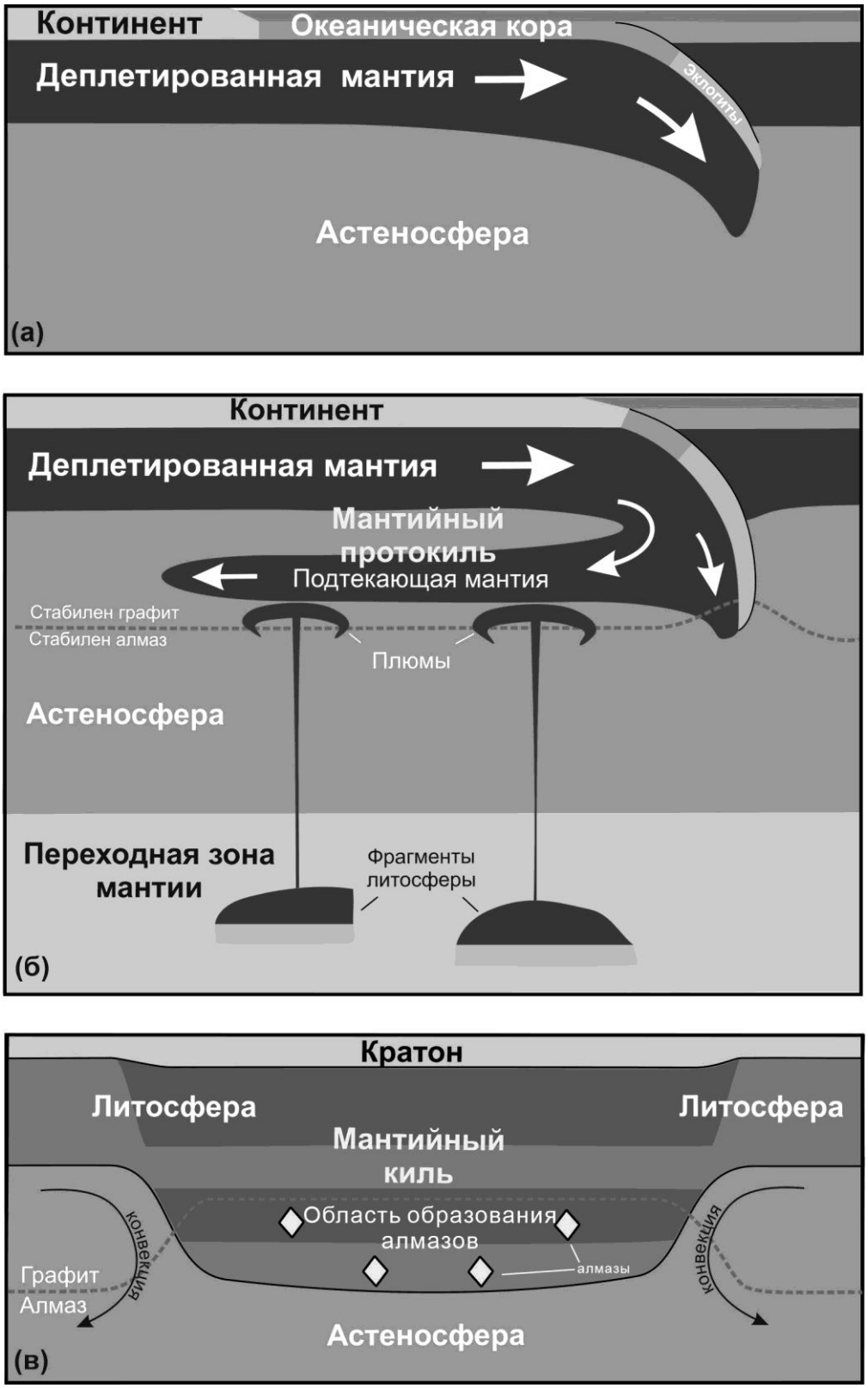



Рисунок. Модель образования мантийного киля под кратоном [6]. (а) – океаническая субдукция с деплетированным слоем мантии под корой; (б) – образование «протокиля» за счет вязкого подтекания деплетированной мантии под континент. Метасоматическое воздействие плюмов на «протокиль»; (в) – кондуктивное охлаждение мантии под континентом, образование мантийного киля и рост в нем алмазов

# ЛИМНОГЕОЛОГИЯ – НОВОЕ, АКТУАЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

*А.А. Рассказов*

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», *г. Москва*
rasskazo@yandex.ru

Лимногеология – междисциплинарное научное направление, активно развивающееся на пересечении целого сектора смежных дисциплин, таких как лимнология и палеолимнология, литология, структурная геология, палеосейсмология, геология осадочных бассейнов, геология полезных ископаемых и др. Хотя лимногеология возникала на базе географических исследований, основная задача этого направления – изучение геологических особенностей разновозрастных озерных структур, в том числе геологического строения и истории формирования озерных котловин, озерной седиментации, фациальной структуры озерных комплексов и литогенетических особенностей их развития, анализ условий образования лимногенных полезных ископаемых и их прогнозирование. Кроме того, строение озерных комплексов рассматривается в качестве палеоархивов не только эволюционных процессов, но и катастрофических событий (землетрясения, цунами, наводнения). Важное влияние на становление лимногеологии оказали американские геологи-нефтяники, разработавшие на базе глобальных обобщений представление о типах озерных осадочных бассейнов с характерной фациальной структурой, спецификой напластования литофаций, комплексом нефтегазогенерирующей органики. Такой генетический характер типизации описывает геохимические особенности лимногенных углеводородов, месторождения которых обеспечивают порядка 20% мировой добычи этого сырья [3]. Формирование и развитие отечественной лимногеологии относится к 90-м годам 20-го века. Становление лимногеологии в качестве самостоятельного геологического направления обусловлено тем, что сегодня преимущественно с озерными условиями связывают образование, в обстановках рифтогенеза, нижних осадочных комплексов платформенных бассейнов. Существенную роль в лимногеологии играют вопросы эволюции озерного седиментолитогенеза. Значительная часть исследований в области лимногеологии традиционно сосредоточена на накоплении не только геологических, но и палеолимнологических данных, восстановленных по осадочным летописям современных и древних озер. Эта задача является общей для лимногеологии и палеолимнологии, с той разницей, что первое направление имеет больший временной охват (от докембрия до позднего голоцена) и решает более широкий круг вопросов [1, 2].

Озерные осадочные комплексы – это индикаторы как медленных неотектонических движений, так и катастрофической сейсмотектонической активности. Анализ разновозрастных лимногенных образований в различных тектонических обстановках указывает на высокую информативность озерных комплексов в качестве индикаторов геодинамических условий на различных масштабных уровнях – от крупных осадочных бассейнов до отдельных внутриформационных структур. Полные озерные циклы начинаются в обстановках медленного компенсированного погружения (мелководные), часто проходят через стадию быстрого некомпенсированного погружения (глубоководные) и заканчиваются при замедлении или инверсии тектонических движений с преобладанием аллювиальных и субаэральных фаций. Озерные фации являются чуткими индикаторами активных морфоструктур в складчатых и платформенных областях. Изучение распределения в разрезах континентальных толщ озерных фации позволяет не

только локализовать районы устойчивых отрицательных тектонических движений, но и выявить распределение таких движений в динамике. Миграция центров озерного осадконакопления является показателем перекоса растущей синклинальной складки. Озера могут быть индикаторами активных разломов. Было выявлено, что озера предгорных областей Урала имеют типоморфоное взаимное расположение с активными разломами сдвигового типа. Для объяснения этого была предложена блоковая модель формирования озерных котловин в секторах локального растяжения, связанного со смещениями по сопряженным системам разносторонних сдвигов. Высокую информативность демонстрирует разрабатываемый совместно с Е.С. Горбатовым (ИФЗ РАН) подход к изучению процессов лимнолитогенеза, базирующийся на исследовании внутриформационных деформаций разного типа и генезиса (разжижения, флюидизации, оползания слабоконсолидированного осадка, микроразрывы и др.), позволяющий решать широкий круг задач в области не только палеогеодинамики и палеосейсмологии, но палеогеографии и криолитологии [2].

Связанные с лимногенными толщами залежи полезных ископаемых содержат, кроме месторождений строительного сырья эвапориты, горючие сланцы, железные руды, бокситы и др., а также служат нефтематеринскими породами. Изучение роли озерных обстановок осадконакопления в континентальном литогенезе, формировании осадочных формаций и связанных с ними месторождений полезных ископаемых, во многом способствовало становлению лимногеологии как самостоятельного геологического направления. Озера служат природными обогатителями широкого спектра полезных компонентов – силикатных, карбонатных, водорастворимых, рудных, органоминеральных и др. Наиболее значимые полезные ископаемые современных озер, кроме воды: сапропель, диатомит, известь и минеральные соли. С древними разновозрастными лимногенными комплексами связаны месторождения песков, глин, горючих сланцев, нефти и газа, углей, фосфоритов, цеолитов, эвапоритов, бокситов, железомарганцевых, медных руд, россыпных минералов, некоторых редких и рассеянных элементов. Большое разнообразие полезных ископаемых древних озерных комплексов связано как с вариациями озерного литогенеза, так и с постседиментационными преобразованиями осадков [1].

Анализ состава вод и осадков озерных структур позволяет не только проследить историю геоэкологического состояния региона, но и спрогнозировать негативные последствия, связанные с нарушением экологии среды. Особая группа проблем, связана с исследованиями, посвященными анализу влияния техногенных факторов на состав вод и осадков современных озер, в том числе с учетом динамики формирования озерных котловин и особенностями миграции, аккумуляции различных геохимических групп природно-техногенных элементов на озерных водосборах. Это, в свою очередь, дает возможность выявления и решения экологических проблем, в которых озерные воды и осадки служат высокочувствительными индикаторами загрязнения окружающей среды [1].

Лимногеологические исследования находят все большее приложение в планетологии. Примером обнаружения современных структур озерного типа (жидкие углеводороды на твердой поверхности) стал самый крупный спутник Сатурна Титан. Предполагается существование лавовых озер из расплавленной серы на спутнике Юпитера Ио. В последние десятилетия на Марсе обнаружены многочисленные следы исчезнувших озер, которые были распространены либо в крупных метеоритных кратерах и бассейнах, либо в линейных впадинах. Геолого-геоморфологические признаки существования озер на Марсе – аллювиальные дельты и эродированные слои озерных осадков с горизонтальной слоистостью. Выявление этих особенностей станет возможным при дальнейшем исследовании детальной информации по лимногенным структурам Марса [1].

1. *Рассказов А.А., Горбатов Е.С.* «Лимногеология и эволюция озерного литогенеза» М.: ИФЗ РАН, 2019. 192 с.

2. *Рассказов А.А, Горбатов., Е.С.* «Основы лимногеологии» М.: РУДН, 2021. 200 с.

3. *Carroll A.R., Bohacs K.M.* Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins // AAPG Bulletin, 2001 V. 85, N. 6 P. 1033–1053.

# РАННИЙ ДОКЕМБРИЙ ВОСТОЧНОЙ САРМАТИИ: ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ

*К.А. Савко*

ФГБОУ «Воронежский государственный университет», *г. Воронеж*
ksavko@geol.vsu.ru

В строении Восточно-Европейского кратона (ВЕК) принимают участие три раннедокембрийских мегаблока: Фенноскандия, Сарматия и Волго-Уралия. Мегаблок Сарматия расположен в южной части (ВЕК) и объединяет Украинский щит и Воронежский кристаллический массив.

*Палеоархей* представлен Курско-Бесединской гранулит-гнейсовой областью (ГГО), включающий древний фундамент ТТГ гранитоидов, на котором залегали вулканогенно-осадочные породы чехла – пелиты, хемогенными железисто-кремнистыми формации (ЖКФ) и основные вулканиты. Они метаморфизованы в условиях гранулитовой фации метаморфизма (≈2,8 млрд л.). ГГО сформировались в палеоархее в результате трех эндогенных событий (≈3,55; 3,470 и 3,35 млрд л.) переработки очень древней эоархейской или даже гадейской коры [1].

В *мезоархее* сформировалась Михайловская гранит-зеленокаменная область (ГЗО). Зафиксировано три импульса ТТГ магматизма (2960, 3025 и 3050 млн лет) [2]. ТТГ имеют ювенильную природу и радиогенный изотопный состав Nd в породах и Hf в цирконе. Метаосадки в ГЗО, содержат кластогенный циркон с возрастами 2,9–3,1 млрд лет и не подверглись гранулитовому метаморфизму с возрастом 2,8 млрд лет.

Таким образом, архейские ГГО и ГЗО до неоархея были разобщены и имели разные источники. Мезоархейская ГЗО присоединилась к палеоархейскому гранулит-гнейсовому ядру в результате коллизии и метаморфизма около 2,8 млрд лет, и в дальнейшем они представляли собой единую континентальную массу.

*Соотношения ГЗО и ГГО*. В слабо метаморфизованных базитах ГЗО встречен ксенолит базитового гранулита. Циркон из него с возрастом 2,8 млрд лет имеет низкорадиогенный состав Hf и палеоархейский модельный возраст. Эти породы по своим петрографическим, геохимическим и изотопным характеристикам аналогичны базитовым гранулитам из ГГО. Кроме того, в единственной крупной палеопротерозойской диоритовой интрузии в пределах ГЗО циркон с возрастом 2,06 млрд лет имеет низкорадиогенный изотопный состав Hf и палеоархейские модельные возрасты. Следовательно, палеопротерозойские диориты в ГЗО имеют палеоархейские источники. Исходя из этого, можно полагать, что в результате коллизии ГЗО была надвинута на гранулит-гнейсовую область.

*Неоархей.* Конец архейской истории ознаменовался появлением внутриплитных калиевых гранитоидов, щелочных пород и карбонатитов. Высококремнистые граниты и риолиты с возрастом 2,61 млрд лет характеризуются высокими температурами расплавов (>900 °C) в неглубоких очагах магмогенерации (< 7 км). Они имели коровый источник, состоящий из палеоархейских метапелитов и ТТГ. Под воздействием глубинного плюма образовались основные магмы, малоглубинные промежуточные очаги которых инициировали плавление кислых пород в верхних частях коры [3].

Щелочные пироксениты, карбонатиты, фоскориты и щелочные сиениты слагают Дубравинскую и Чернянскую интрузии среди палеоархейских ТТГ. Из-за

высокотемпературного метаморфизма (>650 °С, 5 кбар) и частичного плавления изотопные системы в карбонатитах были нарушены, поэтому для определения их возраста мы использовали циркон из щелочных сиенитов, секущих карбонатиты. Возраст его кристаллизации 2589 млн лет. Изотопный состав углерода и кислорода в отвечает первично магматическим карбонатитам.

Источниками расплавов для карбонатитов и щелочных пироксенитов была ювенильная обогащенная сублитосферная континентальная мантия, а для сиенитов преимущественно палеоархейские коровые протолиты.

Внедрение ультракислых гранитоидов, щелочных пород и карбонатитов на рубеже 2.6 млрд лет – это последнее магматическое событие перед длительным перерывом эндогенной активности, продолжавшимся почти 500 млн лет.

*Палеопротерозой.* Мощные осадочные отложения карбонатных, терригенных пород и гигантских ЖКФ, накапливались на архейской пассивной континентальной окраине, но сохранились от размыва только в континентальных рифтах, заложившиеся около 2.2 млрд лет назад. На границе неоархея и палеопротерозоя (2,6–2,4 млрд л.) существовало два бассейна – Михайловский (МБ) и Курско-Криворожский (ККБ). После формирования карбонатной платформы в МБ, а в ККБ терригенных отложений, трансгрессия привела к накоплению мощных ЖКФ. Карбонатные отложения роговской и гданцевской свит в ККБ формировалась в обстановках морских отмелей на регрессивной стадии.

В период 2,4–2,2 млрд лет мы предполагаем эпизоды оледенения, фиксируемые гляциальными диамиктитами. После ~2.2 млрд лет в континентальных рифтогенных впадинах накапливались терррригенно-углеродистые с карбонатами отложения. В них установлены отрицательные аномалии $Ce_{SN}$ и аномально высокие значения $\delta^{13}C$ = 10,4 до 12,1 ‰ PDB, отвечающие событию Ятулий-Ломагунди в период 2,2–2,1 млрд лет.

Проявления базальтового магматизма в рифтах связаны с апвеллингом астеносферных расплавов в зоне деструкции субдуцированной океанической плиты (slab-window) при аккреционно-коллизионногом взаимодействия Курского блока и Волго-Донского орогена на рубеже около 2100 млн лет [4].

В результате коллизии Волгоуралии и Сарматии около 2,1 млрд лет появился коллизионный ороген. Коллизия сопровождалась складчатостью и метаморфизмом с возрастом 2.07 млрд лет. В палеопротерозойских синформах направленный стресс стал причиной вязких деформаций пластичных осадков и зонального метаморфизма [5].

Постколлизионный магматизм Восточной Сарматии с возрастом около 2,06 млрд лет выражен внедрением в кору огромного объема разнообразных магм, совмещенных в пространстве и времени. Это S-, A- и I гранитоиды, диориты, габброиды, сиениты. Такое многообразие обусловлено различиями в строении литосферы, в составе и длительности предыстории корового субстрата, температур, глубин и степени плавления и коровой контаминацией.

1. *Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N. et al.* Chervyakovskaya M.V., Korish E.H., Larionova Yu.O., Bazikov N.S., Tsybulyaev S.V. A buried Paleoarchean core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application// Precambrian Research, 2021. V. 353, 106021

2. *Савко К.А., Самсонов А.В., Сальникова Е.Б. и др.* Мезоархейские тоналит-трондьемит-гранодиоритовые ассоциации Восточной Сарматии: возраст и геологическое положение// Стратиграфия и геол. корреляция. 2019, т. 27, № 5. С. 4–18.

3. *Savko K.A., Samsonov A.V., Kholina N.V. et al.* 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations// Precambrian Research, 2019. V. 322, P. 170–192.

4. *Цыбуляев С.В., Савко К.А., Самсонов А.В. и др.* Палеопротерозойские рифтогенные вулканиты OIB- и MORB-типа Курского блока восточной Сарматии: петрология и геодинамика// Петрология, 2021, т. 29, № 2, с. 136–171.

5. *Savko K.A., Samsonov A.V., Kotov A.B., et al.* The Early Precambrian Metamorphic Events in Eastern Sarmatia// Precambrian Research, 2018. V. 311. P. 1–23.

# МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНУЛИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В СВЯЗИ С ЭВОЛЮЦИЕЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

*О.Г. Сафонов*

ФГБУН «Институт экспериментальной минералогии
им. академика Д.С. Коржинского РАН», *г. Черноголовка*
oleg@iem.ac.ru

Механизмы, время и продолжительность формирования континентальной коры – это одна из наиболее дискуссионных проблем геологии [1, 2]. Докембрийская континентальная кора представлена кратонами – консолидированными блоками коры, постилающимися деплетированной холодной и мощной литосферной мантией. На границах кратонов расположены разновозрастные зоны коллизии и/или аккреции, которые включают комплексы пород гранулитовой фации метаморфизма (гранулитовые комплексы). В составе таких комплексов преобладают супракрустальные породы среднего и кислого состава и метапелиты. Температуры метаморфизма многих докембрийских гранулитовых комплексов, выведенных на поверхность, превосходили 900 °C при давлениях до 1.2 ГПа [3], указывая геотермические градиенты в древней коре >30ºC/км, аномальные для современной коры [4]. Высокие температуры и воздействие водно-углекисло-солевых флюидов способствовали активной мигматизации и анатексису пород гранулитовых комплексов. Диапиризм гранитоидных магм напр. [5] сопровождал эксгумацию этих комплексов в ходе единого или ряда последовательных тектонических событий, записанных обычно в P-T трендах субизотермической декомпрессии [6].

Наряду с этим, геофизические данные и данные по ксенолитам в изверженных породах демонстрируют, что гранулиты широко представлены в нижней коре самих кратонов [7]. Среди «интракратонных» гранулитов преобладают породы основного состава – продукты кристаллизации базальтовых магм, произведенных в верхней мантии [8, 9] и ссылки в этих работах]. Объем супракрустальных пород среди ксенолитов мал [7]. Для «интракратонных» гранулитов характерны P-T тренды субизобарического остывания [6], отражающие воздействие горячих магм и метаморфизм, обусловленный остыванием [8] и отделением флюидов [9] на одном уровне глубины нижней-средней коры.

Возможная генетическая общность гранулитов в основании кратонов и гранулитов из эксгумированных комплексов подвергается сомнению [6–8]). Полагают, что процессы, сформировавшие гранулиты в низах коры, и процессы, приведшие к их эксгумации, заметно разорваны во времени. Имеющиеся геодинамические модели рассматривают либо образование гранулитов, либо их подъем без взаимосвязи этих процессов. В отличие от ранних моделей образования гранулитов в утолщенной коре при коллизии (напр. [10]), современные модели утверждают, что наиболее подходящие условия для образования гранулитов реализуются в условиях не сжатия, а растяжения над областями подъема горячей мантии в мантийных плюмах [8] или в задуговых бассейнах [4]. В этом отношении показательна модели формирования так называемых «ультрагорячих орогенов» [2, 11]. Но ни одна из предлагаемых моделей образования гранулитов в нижней коре не включает процессы их последующей эксгумации.

Наиболее популярны коллизионные модели эксгумации гранулитовых комплексов на конвергентных границах кратонов [2]. Однако существуют веские основания полагать, что подъем гранулитовых комплексов сопровождается, а, возможно, и инициируется, гравитационным перераспределением пород в горячей архейской коре [12].

Какколлизионные модели, так и модель гравитационного перераспределения, основаны на структурных взаимоотношениях гранулитовых комплексов с кратонами. Реконструкции P-T-t трендов их совместной эволюции показывают погружение пород кратона на глубины соответствующие глубинам, на которые были эксгумированы гранулиты напр. [13]. Это отражает геодинамическое взаимодействие поднимающихся гранулитов с породами кратонов. Породы кратона служили источником флюидов и гранитоидных расплавов, проникающих в гранулитовые комплексы в ходе их эксгумации [14].


1. *Rudnick R.L., Fountain D.M.* Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective // Reviews of Geophysics, 1995. V. 33. P. 267–309.

2. *Gerya T.V.* Precambrian geodynamics: concepts and models // Gondwana Research, 2014, V. 25, P. 442–463.

3. *Kelsey D. E., Hand M.* (2015). On ultrahigh temperature crustal metamorphism: phase equilibria, trace element thermometry, bulk composition, heat sources, timescales and tectonic settings // Geoscience Frontiers, 2015. V. 6. P. 311–356.

4. *Brown M.* Metamorphic conditions in orogenic belts: a record of secular change // International Geology Review, 2007. V. 49. P. 193–234.

5. *Safonov O. G., Yapaskurt V. O., Elburg M. A. et al.* Melt-to Shear-Controlled Exhumation of Granulites in Granite–Gneiss Domes: Petrological Perspectives from Metapelite of the Neoarchean Ha-Tshanzi Structure, Central Zone, Limpopo Complex, South Africa // Journal of Petrology, 2021. V. 62. P. 1–26.

6. *Harley S. L.* The origins of granulites: a metamorphic perspective // Geological Magazine, 1989. V. 126. P. 215–247.

7. *Rudnick R. L.* Xenoliths—samples of the lower continental crust // Continental lower crust, 1992. V. 23. P. 269–316.

8. *Bohlen S. R., Mezger K.* Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust // Science, 1989. V. 244. P. 326.

9. *Perchuk A.L., Sapegina A.V., Safonov O.G. et al.* Reduced amphibolite facies conditions in the Precambrian continental crust of the Siberian craton recorded by mafic granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia. Precambrian Research, 2021. V. 357. 106122.

10. *England P.C., Thompson A. B.* Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, Part I: Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust // Journal of Petrology, 1984. V. 25. P. 894–928.

11. *Perchuk A.L., Safonov O.G., van Reenen D.D. et al.* (2018) Precambrian ultra-hot orogenic factory: making and reworking of continental crust // Tectonophysics, 2018. V. 746. P. 572–586.

12. *Perchuk L.L., Gerya T.V.* Formation and evolution of Precambrian granulite terranes: a gravitational redistribution model // In: Origin and evolution of Precambrian high grade gneiss terranes, with special emphasis on the Limpopo Complex of Southern Africa. Geological Society of America Memoirs, 2011. V. 207. P 289–310.

13. *Perchuk L.L., Gerya T.V., van Reenen DD et al.* Comparative petrology and metamorphic evolution of the Limpopo (South Africa) and Lapland (Fennoscandia) high- grade terrains // Mineralogy and Petrology, 2000. V. 69. P. 69–107

14. *Safonov O. G., Reutsky V. N., Varlamov D. A. et al.* Composition and source of fluids in high-temperature graphite-bearing granitoids associated with granulites: Examples from the Southern Marginal Zone. Limpopo Complex, South Africa // Gondwana Research, 2018. V. 60. pp. 129–152.

# ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ В ГЛАВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ ЗЕМЛИ

*С.А. Силантьев*

ФГБУ «Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского РАН» *г. Москва*
silantyev@geokhi.ru

Океаническая литосфера является постоянным участником всех главнейших этапов геодинамической эволюции Земли, а образование и закрытие океанических бассейнов определяет главные геодинамические тренды геологической истории от Хадея до настоящего времени. Процессами, определяющими состав и строение новообразованной океанической литосферы являются мантийный магматизм; коровый метаморфизм, гидротермализм и подводное выветривание. Фундаментальная особенность петрогенезиса в океанических зонах спрединга заключается в тесной связи и взаимодействии контролирующих его процессов. В масштабах геологического времени эти процессы протекают практически одновременно. Действенным инструментом в рамках реконструкции геохимической природы источников магматизма в зонах океанического спрединга служит изучение признаков геохимической сегментации, проявленных на протяжении всего простирания срединно-океанических хребтов (СОХ). Очевидно, геохимическую сегментацию СОХ определяют степень плавления мантийного источника родительских для MORB расплавов, вещественная неоднородность мантийного субстрата, и смешение различных в геохимическом отношении расплавов. Наиболее полно история формирования и эволюции океанической литосферы в зонах спрединга записана во внутренних океанических комплексах, сложенных блоками глубинных пород, поднятых вдоль пологих разломных зон, транспортирующих на поверхность морского дна медленно-спрединговых хребтов нижне-коровые и мантийные породы. Преобразование магматических и мантийных пород по мере их выведения к поверхности отражает регрессивный тренд океанического метаморфизма. Геодинамический конвейер, соответствующий циклу Уилсона [1], перемещает океаническую литосферу к зоне субдукции, в которой рано или поздно океанические бассейны прекращают свое существование. Строение и состав океанической коры оказывает влияние на геохимический профиль супрасубдукционного магматизма. Базальтовая кора, образованная в высокоскоростных центрах спрединга является донором литофильных и сильно несовместимых элементов; в то время как кора низкоскоростных центров спрединга, сложенная преимущественно серпентинитами, служит донором $H_2O$, $CO_2$ , Sr и сидерофильных элементов. Субдуцируемые фрагменты океанической литосферы испытывают высокобарический метаморфизм и, при отмирании зоны субдукции, эксгумируются к поверхности и участвуют в строении офиолитовых разрезов палеоколлизионных зон.

1. *Wilson J.T.* 1966. Did the Atlantic close and then re-open? //Nature, 1966. №211, P.676–681.

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОДИНАМИКА РАННЕЙ ЗЕМЛИ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

*А.И. Слабунов*

ФИЦ Карельский научный центр РАН, *г. Петрозаводск,*
slabunov@krc.karelia.ru

Понимание общих закономерностей эволюции Земли невозможно без объективной информации о ее ранней (до 2.5 млрд лет) истории. Эти данные необходимы как для решения общенаучных проблем, связанных с эволюцией нашей планеты, так и принципиально важны для разработки новых технологий поиска и рационального использования природных ресурсов [1].

Самое древнее из установленных в настоящее время земное вещество – это несколько кристаллов циркона с возрастом до 4.4 млрд лет, найденных в кварцитах кратона Йилгарн (Австралия) [1, 2]. Геохимия этих цирконы позволила показать, что они были равновесны с гранитным расплавом, те 4.4 млрд лет назад существовала континентальная коры. Начиная с 4 млрд лет на планете уверенно фиксируется наличие континентальной и океанической литосферы. Фрагментом первой являются древнейшие (4.12 млрд лет) гранитоиды комплекса Акаста (провинция Слейв, Канада), а второго – 4.11 млрд лет мафит-ультрамафиты зеленокаменного пояса (ЗП) Нуввуагиттук (провинция Сьюпириор, Канада) [2]. Литосфера и взаимодействующие с ней геосферы (астеносфера, гидросфера, атмосфера) на ранних (хадейская (более 4.0 млрд лет) и архейская (4.0–2.5 млрд лет) эры) этапах своей истории становления, вероятно, существенно отличались от современной [2]. Благодаря изучению древнейших (около 3.8 млрд лет) осадочных пород в ЗП Исуа (Гренландия) показано, что среди них присутствуют полосчатые железистые кварциты, хемогенные кварциты и доломиты. Наряду с существованием в разрезе этого ЗП шаровых базальтов это однозначно указывает на существование гидросферы и бескислородной атмосферы. Для полноты картины о ранней Земли следует отметить, что в период 3.8–3.5 млрд лет она становится обитаемой: описаны первые трубчатые микрофоссилии и строматолиты (цианобактериальные маты). Важно также отметить, что 3.2–3.45 млрд лет назад Земля уже обладала магнитным полем, которое, как предполагается, могло «запуститься» немного раньше – 3.75 млрд лет назад [1, 2]. Таким образом, имеющиеся геологические материалы довольно уверенно показывают, что уже в хадее-раннем архее литосфера было дифференцированной, ее вещество активно взаимодействовало с гидросферой и атмосферой, важную роль начинала играть биосфера, защищенная от жесткого излучения космоса магнитным полем. Однако горных пород, сформировавшихся на этом самом раннем этапе, известно слишком мало для того, чтобы делать объективные заключения о геодинамических процессах, обеспечивающих развитие литосферы в этот период. Поиск новых артефактов (минералов, горных пород), позволяющих судить о самой ранней (хадейской) литосфере остается крайне актуальной задачей.

Значительно больше накоплено данных о геологии, составе комплексов, формировавшихся в период начиная с палеоархея (с 3.6 млрд лет). Начиная с этой эпохи возможны палеогеодинамические реконструкции, базирующиеся на актуалистическом подходе [2].

Одной из важных особенностей архейских образований является широкое развитие базальт-коматиитовых комплексов - индикаторов плюмовых процессов. При этом важно отметить, что среди них устанавливаются как контаминированные континентально-коровым веществом комплексы, так и ювенильные - образовавшиеся в океанической обстановке [2], т.е. архейские мантийные плюмы взаимодействовали как с континентальной, так и океанической литосферой.

На Фенноскандинавском щите установлен мезо-неоархейский латеральный ряд метавулканитов островной дуги, осадков преддугового бассейна, супрасубдукционных офиолитов, эклогитов, маркирующий проявление субдукционной геодинамики [3] .

Коллизионные процессы в архее также уверенно устанавливаются, благодаря идентификации архейских метаморфических комплексов кианитовой фации глубинности, S-гранитов, тектонических покровов – типоморфных для коллизии [3].

Наиболее сложной проблемой является объективная оценка состава, строения и особенностей формирования архейской океанической литосферы. Архейские офиолитовые комплексы известны в мире [2, 3], но степень их сохранности и изученности часто не позволяет решить принципиально важные вопросы. К числу таких, конечно, относится проблема оценки мощности древней океанической коры: теоретические расчеты показывают, что древняя океаническая кора должна быть значительно мощнее (до 15–20 км). Изучение древних (архейских) офиолитов, в том числе в пределах Беломорской провинции Фенноскандинского щита, позволяет судить о составе и строении ранней океанической литосферы. Ее мощность оценивается здесь до 85–135 км, а мощность коры 25–30 км, что согласуется с данными по другим структурам этого типа в мире. Важно отметить, что континентальная литосфера, сформировавшаяся в архее, характеризуется существенно большей мощностью (до 200–350 км) по сравнению с фанерозойской (до 150 км). Этот феномен, вероятно, связан с субдукцией мощной океанической литосферы, что подтверждается численным моделированием формирования литосферных килей архейских кратонов [4].

Таким образом, по-крайней мере в мезоархее, отмечаются комплексы-индикаторы всех известные в настоящее время геодинамических процессов (субдукции, спрединга, коллизии, мантийных плюмов). Однако особенности их проявления требуют более детального изучения, с использованием геологических, петрологических методов, а также привлечения численного моделирования [4].

Суперконтинентальная цикличность является прямым следствием (или проявлением) геодинамических процессов на планете. Палеогеодинамические реконструкции архея становятся значительно более объективными благодаря возможности применения к архейским комплексам палеомагнитных методов [5]. Именно данные этих исследований позволяют найти подтверждение того, что глобальные горизонтальные движения литосферных плит были уже архее, причем со скоростями близкими к современным 4–9 см/год [5]. Анализ геологических материалов в сочетании с палеомагнитными данными позволил предложить конфигурацию первого суперконтинента Кенорленд [5]. Эти комплексные исследования требуют продолжения, так как палеомагнитные данные по архею пока немногочисленны.

1. *Слабунов А.И.* Достижения и проблемы геологии докембрия: по материалам 5-го международного симпозиума по архею // Межд. конф., посвященная памяти В.Е.Хаина. Современное состояние наук о Земле. Москва. – 2011. – С. 1730–1734.

2. Earth's Oldest Rocks. Second Edition. Eds.: van Kranendonk M.J., Bennett V.C., Hoffmann J.E. – Elsevier, 2019. – 1078 p.

3. *Слабунов А.И.* Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. – 298 с.

4. *Perchuk A.L., Gerya T.V., Zakharov V.S., Griffin W. L.* Building cratonic keels in Precambrian plate tectonics // Nature. – 2020. – Vol. 586. – P. 395–401.

5. *Lubnina N.V., Slabunov A.I.* Reconstruction of the Kenorland supercontinent in the Neoarchean based on paleo-magnetic and geological data // Moscow University Geology Bulletin, – 2011. – Vol. 66, №4. – P. 242–249.

# «ГЕОЛОГИЯ; ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ; ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА НЕФТИ И ГАЗА»

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ: МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

*А.В. Соловьев*

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», *г. Москва,*
soloviev@vnigni.ru

Процессы образования и разрушения горных систем (складчатых поясов), формирования осадочных бассейнов являются интегральными и зависят от соотношения активности эндогенных (тектоника, магматизм) и экзогенных (денудация, эрозия) факторов. В истории горных систем выделяется три основных стадии формирования: конструктивная (увеличение градиента рельефа), стабильная (устойчивость градиента рельефа), деструктивная (уменьшение градиента рельефа) [1, 3].

**Методология**

Для изучения пространственно-временной взаимосвязи между тектоническими процессами, формированием рельефа, эрозией и седиментацией применяются методы структурного анализа и геотермохронологии (датирование единичных зерен обломочных минералов методами U/Pb SHRIMP, U/Pb LA-ICPMS, U-Th/He, трековый). Данная комплексная методика позволила дать количественные оценки времени и скорости развития тектонических процессов (аккреция, коллизия, эксгумация), реконструировать эволюцию складчатых систем и осадочных бассейнов для Корякско-Камчатского региона, Арктики, Крыма, оценить термальную эволюцию нефтематеринских толщ для снижения риска при проведении поисковых работ на углеводородное сырье [1].

**Кайнозойская геодинамика северо-восточной окраины Азии (Южная Корякия, Камчатка)**

Установлено время и оценены скорости эоценовой коллизии мел-палеоценовой островной дуги с северо-восточной окраиной Азии. На севере Камчатки границей Омгонско-Укэлаятского и Ачайваям-Валагинского террейнов является Лесновско-Ватынский надвиг, формирование которого завершилось около 45 млн. лет назад [1]. На юге Камчатки (Малкинское поднятие Срединного хребта) коллизия дуги и континента началась 55–53 млн. лет назад, а завершилась до 50 млн лет назад [1, 4]. И на севере, и на юге Камчатки коллизионные структуры сформированы за короткие отрезки времени, менее 5 млн лет [1]. Коллизия палеодуги и континента происходила диахронно: 55–50 млн лет назад на юге и 48–45 млн. лет назад на севере Камчатки. Коллизионные деформации везде начинаются с формирования пологого надвига островодужных комплексов на терригенные толщи, на севере процесс коллизии на этом и завершился. А на юге мощность аллохтона была значительно больше, чем на севере. На юге Камчатки в процессе коллизии (55–53 млн. лет) комплексы дуги были надвинуты на отложения континентальной окраины, что вызвало их быстрое погружение, прогрев коры, метаморфизм, мигматизацию и выплавление гранитоидов 52±2 млн. лет назад. Аномально быстрый прогрев коры был связан с подъемом астеносферных масс в результате отрыва слэба Евразиатской плиты, погружавшейся под Ачайваям-Валагинскую дугу.

Впервые методом трекового датирования апатита в зоне эоценовой коллизии дуга-континент получены скорости постколлизионного воздымания и прослежено их изменение вдоль сутуры протяженностью 1500 км с севера (Олюторская зона) до юга (юг Камчатки). На севере Камчатки в интервале 40–10 млн. лет постколлизионный рост гор был медленным, со скоростями 10–50 м/млн. лет, так как коллизия произошла на уровне верхней коры. На юге Срединного хребта орогенез протекал быстрее со скоростью около 180–670 м/млн лет, как результат подъема астеносферных масс в результате отрыва слэба Евразиатской плиты в процессе коллизии.

**Тектоническая и термальная эволюция мезозойских осадочных бассейнов Российской Арктики**

Развитие оборудования и прецизионных методик геотермохронологических исследований открыло новые возможности для изучения осадочных бассейнов [1]. Анализ возрастов единичных обломочных цирконов из песчаников является мощным инструментом для определения областей сноса терригенного материала, обоснования палеогеографических и палеогеодинамических реконструкций. Трекового датирование апатита позволяет получить возраст остывания осадочных толщ при выведении на поверхность и оценить скорости эксгумации комплексов, что является важным для прогноза нефтегазоносности и поиска углеводородов. В результате проведенных исследований идентифицированы основные источники сноса терригенного материала для мезозойских осадочных бассейной Арктики в триасовое [2, 5] и в позднеюрско-раннемеловое время [6], что дало возможность разработать новые палеогеографические схемы и палеотектонические реконструкции.

Трековое датирование апатит позволило охарактеризовать термальную историю и оценить скорости эксгумации нефтематеринских толщ осадочных бассейнов Арктики. Например, триас-юрские отложения скважины Ферсмановская-1 (Баренцево море) находились в зоне частичного отжига (~120–80 °C) в средней юре – мелу, а эксгумация (uplift) началась около 60 млн. лет назад. Трековые возрасты апатита из скважины Северная (Земля Франца-Иосифа) показывают, что эксгумация триасовых пород началось раньше около 90 млн. лет и ее скорость в интервале 90–70 млн. лет назад оценивается в 75 м/млн. лет. Данные трекового датирования имеют важное значение для построения моделей тектонической эволюции Арктики в свете обоснования внешней границы континентального шельфа Российской Федерации.

Таким образом, комплексирование методов структурного анализа и геотермохронологии позволяет получать количественные оценки времени и скорости тектонических процессов, реконструировать эволюцию складчатых систем и осадочных бассейнов, а также оценивать термальную эволюцию нефтематеринских толщ для снижения риска при проведении поисковых работ на углеводородное сырье.

1. *Соловьев А.В.* Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового датирования и структурного анализа // М.: Наука, 2008. 319 с.

2. *Соловьев А.В., Зайончек А.В., Супруненко О.И., и др.* Эволюция источников сноса триасовых отложений архипелага Земля Франца-Иосифа: U/Pb LA-ICPMS датирование обломочных цирконов из скважины Северная // Литология и полезные ископаемые, 2015. № 2. С. 113–128.

3. *Burbank D.W., Anderson R.S.* Tectonic Geomorphology, Second Edition. Wiley-Blackwell. 2011. 460 p.

4. *Hourigan J.K., Brandon M.T., Soloviev A.V., et al.* Eocene arc-continent collision and crustal consolidation in Kamchatka, Russian Far East // American Journal of Science, 2009. Vol. 309. p. 333–396.

5. *Miller E.L., Soloviev A.V., Prokopiev A.V., et al.* Triassic river systems and the paleo-Pacific margin of northwestern Pangea // Gondwana Research, 2013. Vol. 23. Issue 4. pp. 1631–1645.

6. *Miller E., Soloviev A., Kuzmichev A., et al.* Jurassic and Cretaceous foreland basin deposits of the Russian Arctic: Separated by birth of the Makarov Basin? // Norwegian Journal of Geology, 2008. Vol. 88. № 4. pp. 201–226.

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ ГЕОЛОГИИ НЕФТИ И ГАЗА

*Ступакова А.В.*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*
a.stoupakova@oilmsu.ru

В настоящее время в развитии науки геологии нефти и газа в Московском государственном университете успешно сочетаются образование, наука, инновации и реалии производства. Нефтегазовая геология еще долго останется востребованной, но ее применение должно быть актуализировано с учетом развивающихся задач производства. Где искать, что искать и какой объем нефти и газа можно извлечь уже из открытых месторождений – эти вопросы являются сегодня наиболее актуальными на этапе поиска, разведки и разработки месторождений нефти и газа. На эти вопросы невозможно ответить без помощи геолога-нефтяника, понимающего основы формирования месторождений нефти и газа. При выборе технологий добычи углеводородов из природного резервуара необходимо вернуться к механизмам заполнения этого резервуара флюидами, понять направление их движение и внутренние силы, которые держат эти флюиды в пласте.

На каком бы этапе геолого-разведочных работ не находился бы регион, месторождение или залежь, геологу приходится восстанавливать причины, обуславливающие нефтегазоносность территории и интегрировать последовательные процессы, описывающие генерацию, миграцию, аккумуляцию и консервацию углеводородов. В век цифровизации мы моделируем эти процессы, обращая внимания больше на задачи, которые стоят перед исследователем в текущий момент. Однако недопонимание или недоучет начальных причин возникновения залежи может привести к серьезным ошибкам при планировании ее разработки.

Технология прогноза нефтегазоносности осадочных бассейнов геологического прошлого, «палеобассейнов», восстанавливает динамику нефтегазообразования во времени, позволяет моделировать процессы переформирования залежей, выявить участки развития остаточных скоплений в древних толщах, оценить трудноизвлекаемые запасы углеводородов и подобрать комплекс методов, эффективных для их освоения. Эта технология интегрирует большое количество данных, которые требуют последовательных операций по их хранению и использованию. Системный подход, возможность комплексирования данных различного характера необходимы на всех этапах геолого-разведочных работ. При этом фундаментальные вопросы геологии нефти и газа остаются неотъемлемой частью любых технологий и производственных работ, направленных на поиск, разведку и разработку месторождений нефти и газа.

# БИОСТРАТИГРАФИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ОРДОВИКА СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ 30-ЛЕТНЕГО ИЗУЧЕНИЯ КОНОДОНТОВ

*Т.Ю. Толмачева*

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского»», *г. Санкт-Петербург*
tatiana_tolmacheva@vsegei.ru

Определение возраста осадочных образований, реконструкции географии и климата геологического прошлого Земли основаны на ископаемой фауне и флоре. Одной из ведущих фаунистических групп в палеозое являются конодонты – животные неясного систематического положения [1], от которых в ископаемом состоянии остаются лишь разрозненные части их ротового аппарата. Изучение этой группы фауны началось в XIX веке, но наиболее значимые результаты были получены за последние 70 лет, что позволило заложить основы стратиграфии ордовикских (485–443 млн лет) образований в различных регионах мира.

При достаточно высоком уровне изученности конодонтов ордовика, сведения об этой фаунистической группе из разрезов на территории Северной Евразии оставались разрозненными, вплоть до конца XX века. За последние десятилетия автором были получены обширные данные по конодонтам из большей части разрезов ордовика Восточно-Европейской и Сибирской платформ, Северного и Южного Урала, Арктических островов, Северо-Востока России, палеозоид Казахстана и Северной Киргизии [3]. Это позволило не только кардинально изменить представления о биостратиграфии и региональной геологии этих регионов, но и расширить наши знания о обстановках осадконакопления, климате и палеогеографии Земли в ордовикское время.

В результате изучения ордовикских конодонтов Северной Евразии:

– Разработаны биозональные шкалы по конодонтам, включающие глобальную шкалу для глубоководных отложений пелагических бассейнов и окраин палеоконтинентов и региональные последовательности биозон для мелководных отложений разных осадочных бассейнов, которые в ряде регионов являются единственным способом определения возраста и корреляции разрезов [2]. Глубоководная биозональная шкала основана на изучении кремнистых разрезов, входящих в состав палеоокеанических комплексов палеозоид Казахстана [3]. Кремнистые толщи в основном образованы за счет накопления биогенного кремнезема – раковин радиолярий и кремнистых губок и не имеют аналогов в мире, как по длительности существования глубоководных пелагических фаций [4], так и по сохранности разрезов. Конодонты в этих отложениях характеризуются высоким биоразнообразием, что является научным открытием последних лет [2], и представлены таксонами только широкого географического распространения. Для областей развития относительно более мелководных карбонатных толщ биозональные последовательности по конодонтам позволяют определить возраст литостратиграфических подразделений и уточнить корреляцию региональных шкал с Общей стратиграфической шкалой. Например, на два горизонта выше по разрезу, чем считалось ранее, было определено положение границы кембрия и ордовика на Сибирской платформе [5]. Мелководные разрезы в погруженных частях Восточно-Европейской платформы (Калининградская и Ярославская области), на полуострове Таймыр, островах Северной Земли, Новосибирских островов, Южном Урале, ряд районов Казахстана и Северной Киргизии впервые получили характеристику по конодонтам [2, 5].

− Разработан новый подход к биогеографическому районированию конодонтов ордовика и изменены представления о палеогеографии ордовика Северной Евразии. Выделение наиболее крупных единиц биогеографического районирования – Царства открытого моря и мелководных морей [2] дает возможность структурирования биогеографических и уточнения палеогеографических построений по мелководным шельфовым и эпиконтинентальным бассейнам. Уточнены современные палеогеографические/палинспастические реконструкции ордовика, показано большее расстояние между палеоконтинентом Балтикой и Казахстаном, более близкое положение Лаврентии и Сибири относительно северной окраины Балтики в среднем ордовике [2], близкое положение микроконтинента Кара к южной окраине Восточно-Европейской платформы и тектонических блоков Северо-Востока России к Сибирской платформе. Доказано существование ордовикских отложений в северной части Восточно-Европейской платформы, разрез которых реконструирован по ксенолитам кимберлитовых трубок Юго-Восточного Беломорья, что полностью меняет палеогеографические реконструкции этого региона в раннем палеозое [6].

− Установлено время запуска глобальной термогалинной циркуляции водных масс в океанах, связанной с общим похолоданием климата в ордовике [2]. Это событие привело к насыщению кислородом донных вод и пространственному перераспределению питательных веществ, что, возможно, явилось причиной «Великого ордовикского события биоразнообразия» (GOBE). Выявлено, что циркуляции вод в океанах началась значительно раньше, чем предполагалось на основе геохимических исследований мелководных карбонатных разрезов. Ее отражением в пелагических разрезах Казахстана является переход от темноцветных, обогащенных органическими веществом, кремнистых пород верхнего кембрия – нижнего ордовика к красноцветным кремням и яшмам дапинского яруса среднего ордовика [2].

− Реконструирован образ жизни конодонтов, как обитающих в пелагиали морей и океанов плотоядных хищников, питающихся особями других видов конодонтов и пелагическими артроподами. Такой вывод основан на изучении фекальных пеллет конодонтов, встречающихся в темноцветных кремнистых разрезах верхнего кембрия – нижнего ордовика [2]. Состав фекальных пеллет указывает, что конодонты обитали в стаях особей одного вида подобно современным мелким пелагическим рыбам.

− В настоящее время на данных о распространении конодонтов основаны две из семи ярусных границ ордовика Международной стратиграфической шкалы, а биозональные шкалы по конодонтам являются важнейшей частью региональных стратиграфических схем, серийных и полистных легенд геологических карт.

1. *Donoghue P.C.J., Rücklin M.* The ins and outs of the evolutionary origin of teeth // Evolution, Development, 2014. № 18 (1). P. 19–30.

2. *Толмачева Т.Ю.* Биостратиграфия и биогеография конодонтов ордовика западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса. Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, Т. 356. 2014. 264 с.

3. *Tolmacheva T.Yu., Degtyarev K.E., Ryazantsev A.V.* Ordovician conodont biostratigraphy, diversity and biogeography in deep-water radiolarian cherts from Kazakhstan. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021. № 578. P. 110572.

4. *Tolmacheva T.Yu., Danelian T., Popov L.* Evidence for 15 million years of continuous deep-sea biogenic sedimentation in early Paleozoic oceans // Geology, 2001. № 8. P. 755–758.

5. *Tolmacheva T.Yu., Abaimova G.P.* Late Cambrian and Early Ordovician conodonts from the Kulumbe River section, northwest Siberian Platform. Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists, 2009. № 37. P. 427–451.

6. *Толмачева Т.Ю., Алексеев А.С., Реймерс А.Н.* Конодонты в ксенолитах из кимберлитовых трубок Юго-Восточного Беломорья (Архангельская область): ключ к реконструкции стратиграфии и палеогеографии Восточно-Европейской платформы в ордовике. Доклады Академии наук, 2013. Т. 451 (1). С. 68.

# ТРАНСРЕГИОНАЛЬНЫЕ ЗОНЫ СДВИГА И АМЕРАЗИЙСКАЯ МИКРОПЛИТА В ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОКЕАНА В АРКТИКЕ

*Э.В. Шипилов*

ФБГНУ «Полярный геофизический институт», *г. Мурманск*
shipilov@pgi.ru

По результатам интерпретационного анализа комплекса геолого-геофизических данных акцентируется внимание на сдвиговой тектонике, ареалах и особенностях распространения позднемезозойского магматизма и использовании результатов интерпретационного анализа в реконструкциях становления геоструктур в геодинамической эволюции Арктического океана [1–3,7]. Базовое положение в разрабатываемой модели эволюции [1] состоит в том, что раскрытие глубоководных бассейнов Арктики происходило в тылу плит, перемещаемых верхнемантийной конвекцией по протяженным сдвиговым системам в сторону тихоокеанских зон субдукции. К категории таких выявленных трансрегиональных зон сдвига относятся **Чукотско-Канадская**, **Хатангско-Ломоносовская** и **Северогренландско-Канадская** системы разломов. Первая из них, простираясь от подножья Канадской окраины вдоль восточного фланга Чукотского поднятия и южнее, играла основополагающую роль в юрско-меловое время при косом рифтогенно-спрединговом раскрытии Канадского бассейна и соответствующем перемещении микроплиты Арктическая Аляска.

Активизация сдвиговых перемещений по трансрегиональным окраинно-континентальным зонам разломов – Хатангско-Ломоносовской и Северогренландско-Канадской – связывается с позднемеловым-палеоценовым временем. Как следствие была обособлена и приведена в движение образовавшаяся новая композитная **Амеразийская микроплита**, которая объединила в себе блоки Арктической Аляски, Канадской котловины, Чукотского поднятия, поднятия Альфа–Менделеева, котловин Подводников и Макарова, и хребта Ломоносова (рис.). Перемещение микроплиты по указанным зонам сдвигов на краях Канадского арктического и Сибирско-Чукотского шельфов было направлено в сторону Тихоокеанской зоны субдукции. Движение Амеразийской микроплиты сопровождалось рифтогенезом и отрывом хребта Ломоносова от Баренцево-Карской окраины, раскрытием Евразийского бассейна в тылу хребта и трансформными смещениями – правосторонними вдоль Хатангско-Ломоносовской зоны и левосторонними вдоль Северогренландско-Канадской разломной зоны. Вместе с тем, в результате перемещения Амеразийской микроплиты до этого единый ареал меловых платобазальтов (HALIP), сопровождавший формирование структур Амеразийского баасейна, был разорван, и Центрально-Арктическая провинция магматизма оказалась отделенной и отодвинутой от Баренцевоморской провинции (рис.).

Исследованиями установлено, что в сценариях развития Евразийского и Канадского бассейнов наблюдается определенное сходство: заложение на рифтованной меловой континентальной коре, участие в развитии трансрегиональных зон сдвига с обособлением микроплит, медленный/ультрамедленный спрединг и значительно меньшая площадь развития океанической коры, чем это считалось ранее [**7**]. Разработанные реконструкции значительно расширяют возможности интерпретационного анализа геолого-геофизических данных и позволяют устранить ряд проблем (зияния или перекрытия плит и др.) при палеотектонических построениях.

1. *Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В.* Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли, 2013. № 6. С. 20–38.

2. *Шипилов Э.В.* К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин Арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника, 2004. № 5. С. 26–52.

3. *Шипилов Э.В.* Генерации спрединговых впадин и стадии распада Вегенеровской Пангеи в геодинамической эволюции Арктического океана // Геотектоника, 2008. № 2. С. 32–54.

4. *Шипилов Э.В.* Позднемезозойский магматизм и кайнозойские тектонические деформации Баренцевоморской континентальной окраины: влияние на распределение углеводородного потенциала // Геотектоника, 2015. № 1. С. 60–85.

5. *Шипилов Э.В.* Базальтоидный магматизм и сдвиговая тектоника арктической континентальной окраины Евразии в приложении к начальному этапу геодинамической эволюции Амеразийского бассейна // Геология и геофизика, 2016. Т. 57. № 12. С. 2115–2142.

6. *Шипилов Э.В., Лобковский Л.И.* Позднемезозойский плюмовый магматизм арктического региона: геохронология, фазы и геодинамические обстановки проявления // Арктика: экология и экономика, 2016. № 2 (22). С. 72–81.

7. *Шипилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И., Кириллова Т.А.* Геодинамические обстановки в зоне сопряжения хребта Ломоносова и Евразийского бассейна с континентальной окраиной Евразии // Геотектоника, 2021. № 5. С. 3–26.

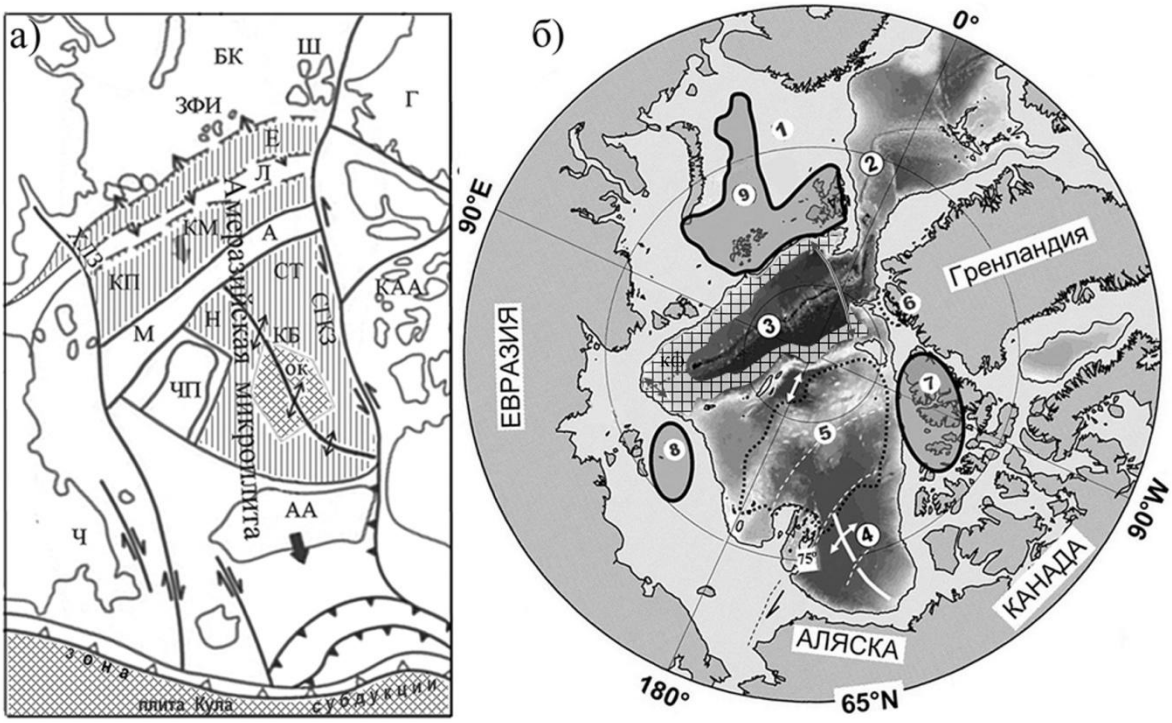



Рисунок. Трансрегиональные зоны сдвига, тектоническая позиция Амеразийской микроплиты и распространение позднемезозойского магматизма Арктики

а) Палеотектоническая реконструкция на позднемеловое время. Штриховка: вертикальная – меловая рифтованная кора; ромбическая – океаническая кора. БК – Баренцево-Карская окраина, ЗФИ и Ш – Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, Е – формирующийся Евразийский бассейн, Л – блок хребта Ломоносова; трансформно-

сдвиговые зоны: ХЛЗ -Хатангско-Ломоносовская, СГКЗ – Северогренландско-Канадская; бассейны: КП – Подводников, КМ – Макарова, КБ – Канадский (ок – океаническая кора), Н – Наутилус, СТ – Стефансона; поднятия: А и М – Альфа-Менделеева, ЧП – Чукотское; Г – Гренландия, Чукотка, АА – Арктическая Аляска.

б) Физико-географические элементы и ареалы позднемезозойского магматизма [4–6]. 1 – Баренцевоморская континентальная окраина; океанические бассейны со спрединговыми центрами: 2 – Норвежско-Гренландский с хр. Книповича, 3 – Евразийский с хр. Гаккеля, штриховка квадратами (кф) – сильно растянутый континентальный фундамент, 4 – Канадский. Стрелки – направления растяжения. Черными линиями и точечным пунктиром оконтурены ареалы мелового магматизма: 5 – Центрально-Арктический, 6 – Северо-Гренландский, 7 – Свердрупский, 8 – Де Лонга, 9 – Баренцевоморский [4–6].

# ПЕРМСКИЙ ЭТАП ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ: БИО- И ХЕМОСТРАТИГРАФИЯ, ИЗОТОПНОЕ ДАТИРОВАНИЕ, ГЕОБИОСФЕРНЫЕ СОБЫТИЯ, ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

*А.С. Бяков*

ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДО РАН», *г. Магадан*
abiakov@mail.ru

Пермская система – единственная, установленная в России, поэтому ее изучение особенно важно для российских специалистов. Пермь характеризуется огромным разнообразием фаций и очень резкой дифференциацией биоты, в связи с чем отсутствуют универсальные группы организмов, которые бы позволяли осуществлять глобальные корреляции разрезов. И это крайне актуально для Северо-Востока России, где сохранились уникальные по своей полноте морские стратиграфические последовательности, но очень велик эндемизм пермской фауны, не позволяющей напрямую устанавливать ярусы Международной стратиграфической шкалы (МСШ). Существует лишь один путь к решению этой проблемы – широкое использование прецизионного радиоизотопного датирования региональных реперных стратиграфических уровней и современных методов изотопной хемостратиграфии.

До начала исследований автора (80-е годы прошлого века) существовала крупная научная и практическая проблема, связанная с расчленением и обоснованием возраста многокилометровых пермских терригенных толщ верхоянского комплекса и его аналогов, в которых локализованы крупные месторождения золота. Оставались нерешенными и многие научные задачи: полнота пермского разреза, возможность точных внутри- и межрегиональных корреляций, реконструкция условий осадконакопления, палеогеографии и климата. Эти задачи последовательно решались и решаются автором как лично, так и в кооперации с многими отечественными и зарубежными специалистами. Одним из важнейших результатов исследований явилась разработка детальной зональной биостратиграфической шкалы перми Северо-Востока Азии по двустворчатым моллюскам, являющейся надежным инструментом расчленения и корреляции не только разнофациальных пермских отложений региона, но и Арктики (север Сибири, Таймыр, Новая Земля, Пай-Хой), Забайкалья и Монголии [1]. На базе разработанной биостратиграфической шкалы оказалось возможным решать широкий круг фундаментальных и прикладных задач: от детального стратиграфического расчленения разрезов (в том числе и нефтегазоносных толщ севера Сибири) и геологического картирования до межрегионалных корреляций и реконструкции крупных геобиосферных событий, палеосреды и палеоклимата.

Дальнейшее совершенствование разработанной биостратиграфической шкалы, интегрированной в Региональную стратиграфическую шкалу, связано с использованием прецизионного U-Pb датирования региональных реперных стратиграфических уровней, а также современных методов изотопной хемостратиграфии [2, 3, 6, 9, 10]. Благодаря этим исследованиям впервые на Северо-Востоке России установлены аналоги большинства ярусов средней и верхней перми МСШ [2, 3, 9, 10]. Изучение наиболее распространенной группы ископаемых организмов – двустворчатых моллюсков позволило разработать биогеографическое районирование Бореальной надобласти и установить

палеобиогеографические критерии геодинамики террейнов для Колымо-Омолонской и Верхояно-Охоткой провинций в перми [1, 7].

Для крайнего северо-запада Тихоокеанского подвижного пояса пермь – один из наиболее сложных и уникальных этапов геологического развития; в это время проявились разнонаправленные тектонические тенденции, связанные с заложением и развитием глубоководных морских бассейнов в результате процессов рифтогенеза и активизаций островодужного вулканизма на фоне формирования суперматерика Пангея-2. Синтез материалов как других авторов, так и собственных данных, позволил осуществить типизацию всего многообразия пермских седиментационных бассейнов Северо-Востока России, выполненную на геодинамической основе [4].

В течение перми, особенно во второй половине периода, произошли крупные биосферные события, в том числе крупнейшее в истории Земли вымирание. На основе изменения динамики таксономического разнообразия основных групп биоты эти события были выявлены и на Северо-Востоке Азии [1, 8]. Получены новые важные материалы по позднепермскому вымиранию организмов [5]. Показано, что это вымирание не было синхронным в бассейнах разных климатических зон и связано с развитием пермо-триасового [11] суперплюма; эти исследования актуальны и для разработки сценариев современных климатических изменений.

1. *Бяков А.С.* Зональная стратиграфия, событийная корреляция, палеобиогеография перми Северо-Востока Азии (по двустворчатым моллюскам). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2010. 262 с.

2. *Бяков А.С., Брынько И.В., Бонд Д. и др.* Новые минимальные значения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в биогенных карбонатах перми Омолонского массива (Северо-Восток Азии) // ДАН. 2019. Т. 488. № 4. С. 397–402.

3. *Бяков А.С., Захаров Ю.Д., Хорачек М., Горячев Н.А.* О положении границы вучапинского и чансинского ярусов на Северо-Востоке России по радиоизотопным и хемостратиграфическим данным // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 131–134.

4. *Бяков А.С., Прокопьев А.В., Кутыгин Р.В. и др.* Геодинамические обстановки формирования пермских седиментационных бассейнов Верхояно-Колымской складчатой области // Отечественная геология. 2005. № 5. С. 81–85.

5. *Бяков А.С., Кутыгин Р.В., Горячев Н.А. и др.* Открытие позднечансинского комплекса двустворок и два эпизода вымирания фауны в конце перми на Северо-Востоке Азии // ДАН. 2018. Т. № 480. № 1. С. 121–124.

6. *Бяков А.С., Horacek M., Горячев Н.А. и др.* Первая детальная запись $\delta^{13}C_{org.}$ В пограничных пермо-триасовых отложениях Колымо-Омолонского региона (Северо-Восток Азии) // ДАН. 2017. Т. 474. № 3. С. 347–350.

7. *Biakov A.S, Shi G.R.* Palaeobiogeography and palaeogeographical implications of Permian marine bivalve faunas in Northeast Asia (Kolyma-Omolon and Verkhoyansk-Okhotsk regions, northeastern Russia) // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2010. V. 298. P. 42–53.

8. *Davydov V.I., Biakov A.S.* Discovery of shallow-marine biofacies conodonts in a bioherm within the Carboniferous-Permian transition in the Omolon Massif, NE Russia near the North paleo-pole: Correlation with a warming spike in the southern hemisphere // Gondwana Res. 2015. V. 28. P. 888–897.

9. *Davydov V.I., Biakov A.S., Crowley J.L. et al.* Middle Permian U-Pb zircon ages of the “glacial” deposits of the Atkan Formation, Ayan-Yuryakh anticlinorium, Magadan province, NE Russia: Their significance for global climatic interpretations // Gondwana Res. 2016. V. 38. P. 74–85.

10. *Davydov V.I., Biakov A.S., Schmitz M.D., Silantiev V.V.* Radioisotopic calibration of the Guadalupian (middle Permian) Series: review and updates // Earth Sci. Rev. 2018. V. 176. P. 222–240.

11. *Davydov V., Karasev E., Nurgalieva N. et al.* Climate and biotic evolution within the Permian-Triassic transition in the temperate Northern Hemisphere, Kuznetsk Basin, Siberia, Russia // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2021. V. 573. P. 1–26.

# ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО СЕКТОРА ТИХООКЕАНСКОЙ ОКРАИНЫ АЗИИ В МЕЗОЗОЕ

*И.В. Кемкин*

ФГБУН «Дальневосточный геологический институт ДВО РАН» *г. Владивосток*
kemkin@fegi.ru

Характерной особенностью складчатых поясов является широкое развитие в них вулканогенно-карбонатно-кремнисто-терригенных породных ассоциаций значительной мощности. Например, в центральной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса (далее Сихотэ-Алинь) до середины 1980 годов эти образования включались в состав 7 последовательных свит общей мощностью более 15 км и рассматривались как эвгеосинклинальная формация. Строение Сихотэ-Алиня представлялось как нормальная стратиграфическая последовательность разнофациальных отложений, смятых в ассиметричные разноамплитудные складки и осложненных поздними разрывными нарушениями типа сдвигов, сбросов, взбросов и надвигов.

Проводимые в 1980 годах в Сихотэ-Алине биостратиграфические (на основе микрофауны) исследования этих карбонатно-кремнисто-терригенных образований позволили выявить важную особенность. Например, в центральном Сихотэ-Алине все терригенные породы во всех свитах более 15 километрового разреза, оказались юрского возраста, а залегающие среди них на разных стратиграфических уровнях кремни, известняки и другие литологические разности имеют более древний возраст – каменноугольный, пермский, триасовый и раннеюрский. Стало очевидным, что многократное чередование в пределах многокилометрового разреза палеозойских известняков, палеозойских и раннемезозойских кремней и юрских терригенных пород не может быть седиментационным. Такое строение – это результат тектонического совмещения в единый разрез разнофациальных и разновозрастных образований.

Дальнейшими литолого-фациальными исследованиями было установлено, что кремни являются типичными биогенными отложениями, которые при незначительной мощности (до 100 м) охватывают возрастной интервал в 70–100 млн лет. Низкие скорости седиментации (около 1 мм в 1000 лет), а также залегание их на толеитовых базальтах СОХ-типа указывали, что накопление их осуществлялось в пелагической (т.е. максимально удаленной от терригенных источников) части палеоокеана, с глубинами большими уровня карбонатной компенсации, что позднее было подтверждено и геохимическими исследованиями [1]. Известняки, представляющие собой типичные рифогенные породы, по совокупности характерных признаков были сопоставлены с фрагментами палеогайотов [2], что также характеризует их океаническую природу. Присутствующие среди юрских терригенный пород среднепалеозойские базальты, габброиды и ультрамафиты были идентифицированы как тектонически разобщенные фрагменты единой офиолитовой ассоциации [3], т.е. последовательный комплекс пород, слагающих разрез коры океанического типа.

Совокупность всех данных убедительно показала, что реальное строение Сихотэ-Алиня представляет собой тектонический пакет многократного чередования тектоно-стратиграфических единиц (или пластин), сложенных разновозрастными фрагментами осадочного чехла океанической плиты и терригенных отложений приконтинентальной области седиментации. Такое строение полностью соответствовало аккреционным призмам, специфической категории геологических образований, формирующихся в ходе

субдукции океанической литосферы и частичной аккреции фрагментов ее осадочного чехла. В соответствии с возрастом терригенных пород, характеризующих время аккреции, в структуре Сихотэ-Алиня были выделены фрагменты трех разновозрастных аккреционных призм: юрской, позднеюрско-раннемеловой и ранне-среднемеловой.

Дальнейшие литолого-биостратиграфические исследования в пределах отдельных тектонических единиц, сложенных разными литогенетическими типами пород показали, что они представляют собой тектонически разобщенные фрагменты некогда единой седиментационной последовательности типа Oceanic Plate Stratigraphy Sequences, т.е. последовательность отложений накопившихся на океанической плите в ходе ее дрейфа от зоны спрединга до зоны субдукции. В соответствии с возрастом океанических и перекрывающих их терригенных пород было выделено несколько таких OPS последовательностей, характеризующих разновозрастные участки океанической плиты.

На основании этих данных стало возможным реконструировать эволюционную последовательность эпизодов субдукции и частичной аккреции фрагментов чехла разновозрастных (т.е. разно удаленных от центра спрединга) участков океанической плиты и расчленить аккреционные призмы Сихотэ-Алиня на разновозрастные тектоно-стратиграфические комплексы, отражающие последовательность формирования аккреционных призм с одной стороны, и состав и морфологию субдуцированной океанической плиты с другой. Данные по особенностям состава, строения и последовательности образования аккреционных призм Сихотэ-Алиня, а также других структурно-вещественных комплексов, участвующих в его строении, позволили существенно уточнить представления об истории формирования и мезозойской геодинамической эволюции восточной окраины Палео-Азиатского континента.

Формирование континентальной коры центрального сектора Тихоокеанской окраины Азии в мезозое осуществлялось в несколько этапов, которые характеризуются разными геодинамическими режимами. В хронологическом порядке это: пассивная континентальная окраина (доюрский период); активная континентальная окраина андийского типа (ранняя-поздняя юра); трансформная континентальная окраина в сочетании с активной континентальной окраиной андийского типа (поздний титон-ранний готерив); трансформная окраина в сочетании с активной континентальной окраиной японского типа (средний готерив-ранний альб); трансформная континентальная окраина (средний альб-средний сеноман); и снова активная континентальная окраина андийского типа (поздний сеноман-ранний палеоцен).

Основными геологическими процессами формирования континентальной коры Восточно-Азиатской окраины в этот период были: аккреция разновозрастных океанических фрагментов (в ходе субдукции Палео-Тихоокеанской плиты); последующая деформация пород аккретированных структурно-вещественных комплексов, включая смятие в разноамплитудные складки и сдваивание фрагментов разрезов по многочисленным надвигам в условиях трансформной окраины (вызвавшие многократное увеличение вертикальной мощности отложений); а также формирование гранитно-метаморфических комплексов за счет внедрения орогенных гранитоидов в породы аккретированных структурно-вещественных комплексов.

1. *Кемкин И.В., Ханчук А.И., Кемкина Р.А.* Геохимические особенности кремней самаркинского террейна (Сихотэ-Алинь) и масштаб аккретированной палеоокеанической плиты // Геология и геофизика, 2018. Т. 59, № 2. С. 143–157.

2. *Ханчук А.И., Никитина А.П., Панченко И.В., Бурий Г.И., Кемкин И.В.* Палеозойские и мезозойские гайоты Сихотэ-Алиня и Сахалина //Доклады АН СССР, 1989. Т. 307, № 1. С. 186–190.

3. *Ханчук А.И., Панченко И.В.* Гранатовое габбро в офиолитах Южного Сихотэ-Алиня //Доклады АН СССР, 1991. Т. 321. № 4. С. 800–803.

# ЗОЛОТОНОСНЫЕ ЭНДОГЕННЫЕ И ЭКЗОГЕННЫЕ РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ

*Ю.А. Калинин*

ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН», *г. Новосибирск*
kalinin@igm.nsc.ru

Разработка теоретических основ эндогенного и экзогенного рудообразования и металлогении, несомненно, относится к одной из наиболее актуальных проблем наук о Земле. Металлогеническое районирование Кузнецкого Алатау [1], Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны [2], выполненное совместно с коллегами, послужило основой для разработки прогнозно-поискового комплекса золоторудных месторождений для каждого из регионов и построения геолого-генетических моделей эндогенных рудообразующих систем.

Для эталонных золоторудных месторождений в углеродистых терригенно-карбонатных комплексах Восточного Казахстана (Суздаль, Бакырчик, Большевик и др.) установлены источники вещества и механизмы формирования полистадийного оруденения. Общим для них является локализация золотосодержащих прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд во флишоидных углеродисто-песчано-сланцевых и турбидитовых толщах разного возраста, структурно-тектонический контроль оруденения, частое присутствие в рудоконтролирующих зонах даек средне-основного состава, проявление посторогенных разновозрастных интрузивных гранит-гранодиоритовых пород, связь золотого оруденения с которыми не всегда очевидна. На основе изучения минералогии руд и околорудных метасоматитов, изотопно-геохимических исследований источников рудного вещества, анализа связи оруденения с магматизмом разработаны геолого-генетические модели рудообразующих систем разнообразных месторождений золота. Одним из важнейших элементов таких моделей является анализ возрастных соотношений магматизма и оруденения. Представлены новые данные о возрасте магматических пород и рудно-метасоматических образований на золоторудных месторождениях Акжал-Боко-Ашалинской рудной зоны Западно-Калбинского золотоносного пояса Восточного Казахстана [3]. Месторождения по своей рудно-формационной принадлежности более всего соответствуют орогенному типу золоторудных месторождений, что в целом отражает металлогеническую специфику региона. Другим важным типом золотого оруденения Казахстана являются Intrusion-related gold systems (IRGS), связанные с интрузивами штокверковые месторождения. Рудообразующие системы этого типа имеют ряд сходных характеристик с типичными золото-сульфидно-кварцевыми (орогенными) системами.

В Акжал-Боко-Ашалинской рудной зоне отчетливо фиксируется уровень гранитоидного магматизма 306–290 млн л (кунушский комплекс), с которым в Западной Калбе связывают всю золотоносность, и очень близкий к нему возраст золоторудной минерализации (от 284.0±3.0 до 302.5±3.8 млн л, $^{40}Ar/^{39}Ar$ возраст серицита). Предполагается, что это тип IRGS. Золоторудная минерализация уровня – 275–285 млн л – месторождения «орогенного» типа, их возраст коррелирует с возрастом основных массивов максутского пикрит-диабазового комплекса (280 – 277±2,8 млн л), увязываемого с процессами плюмового магматизма, проявленного в таримской LIP.

По результатам экспертных и прогнозно-поисковых работ в Анти-Атласе (Марокко) получены новые важные геологические и минералого-геохимические данные об условиях образования и закономерностях локализации ртутно-серебряного оруденения. Установлены особенности его структурного контроля в обстановках растяжения и сдвиговых деформаций, сопряженных с Имитерской системой разломов. Получены доказательства постмагматического образования гидротермального низкотемпературного ртутно-серебряного оруденения, а геохронологическими данными обоснован его мезозойский возраст (254,7±3,2 млн л), соответствующий возрасту вулкано-плутонических структур триас-юрского рифтинга в Атлантике. Кроме того, в рудном поле Имитер установлен новый тип гидротермального раннекембрийского золото-барит-ртутно-серебряного оруденения предположительно раннекембрийского возраста, локализованный в некках риолитов. Разработан комплекс критериев прогноза промышленного оруденения в рудном поле Имитер [4]. Для гидротермального кобальт-арсенидного месторождения Бу Аззер, эталонного объекта низкотемпературных Ni-Co-As (U-Ag) месторождений «пятиэлементной» формации, показана индикаторная роль минералого-геохимических особенностей рудных парагенезисов в прогнозе и поисках «слепых» рудных тел.

Изучение экзогенных рудообразующих систем, формирующих крупные золотоносные месторождения в корах выветривания различного типа, позволило получить ряд важных результатов и обобщений.

Показано, что экзогенная золотоносная система наследует главные минералого-геохимические особенности эндогенного золотого оруденения региона. Доказано, что золотоносные коры выветривания развиваются как за счет месторождений и рудных тел, так и рассеянной золотоносной минерализации в породах субстрата. Их формирование осуществляется при совокупном проявлении: – остаточного накопления Au в линейных гипергенных зонах, сохраняющие морфологические черты эндогенных; – хемогенного перераспределения тонкодисперсного золота сульфидов, переходе его в подвижные комплексы, их миграции и осаждении золота на геохимических барьерах; – механического переотложения и гравитационного обогащения Au, в том числе в карстовых депрессиях. Предложена геолого-генетическая модель гипергенного концентрирования золота в коре выветривания [5]. На основе этой модели разработан прогнозно-поисковый комплекс золотоносных кор выветривания, совместно с продуктами ближнего переотложения представляющих собой нетрадиционный геолого-промышленный тип. Обосновано выделение складчатого обрамления Западно-Сибирской равнины в качестве новой провинции золотоносных месторождений коры выветривания [6].

1. *Алабин Л.В., Калинин Ю.А.* Металлогения золота Кузнецкого Алатау // Монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999 (Труды ОИГГиМ, вып.843). 237 с.

2. Минерагения области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны // Монография / Авторы: Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В., Нестеренко Г.В., Калинин Ю.А. и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 243 с.

3. *Kalinin Yu.A., Kovalev K.R., Serdyukov A.N. et al.* 2021. Age constraints and metallogenic prediction of gold deposits in the Akzhal-Boko-Ashalin ore zone (Altai accretion-collision system). Geodynamics & Tectonophysics 12 (2), 392–408.

4. Критерии прогноза промышленного оруденения в рудном поле Имитер (Марокко) / Отв. Редактор акад. РАН В.В. Ярмолюк. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2013. 272 с.

5. *Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г.* Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск: Академич. изд-во «Гео». 2006. 339 с.

6. *Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Нестеренко Г.В., Рослякова Н.В., Осинцев С.Р.* Обрамление Западно-Сибирской равнины – новая провинция золоторудных месторождений коры выветривания // Геология и геофизика, 1999, т.40, № 6. С. 884–895.

# РУДОГЕНЕЗ МАССИВНЫХ ЭПГ-CU-NI СУЛЬФИДНЫХ РУД (ТАЛНАХСКАЯ ИНТРУЗИЯ) И ЭПИТЕРМАЛЬНОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИ МАЛЕТОЙВАЯМ (КАМЧАТКА)

*Н.Д. Толстых*

ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН», *г. Новосибирск*
tolst@igm.ru

I. Месторождения Норильского региона долгие годы всесторонне изучаются многими исследователями. Их опыт и результаты были учтены нами при публикации статей по этой теме [1, 2]. Здесь представлено обобщение оригинальных материалов с целью показать, что геохимическая специализация и рудный потенциал сульфидных руд Норильских интрузий определяются степенью фракционирования сульфидного расплава в промежуточной магматической камере.

1) Рудное тело Южная-2 массивных руд Талнахской интрузии сложено, преимущественно, халькопиритом. Отношение легкоплавких платиноидов к тугоплавким (40 000), а также модельные кривые свидетельствуют о максимальной степени фракционирования сульфидного расплава (рис. 1а), что обуславливает высочайшее обогащение Cu до 28 мас.%, Ni до 6,3 мас.% и (Pt+Pd) до 220 г/т. Это проявляется также в особенностях составов минералов: предельно обогащенные медью станнопалладинит, свинцом – полярит, никелем – палладоарсенид, палладием – пентландит [3], которые не встречались в других рудах Норильского региона. Сперрилит – типичный минерал всех других руд Норильских месторождений, отсутствует в ассоциации. Последовательность кристаллизации МПГ: Pt-Pd-Sn (рустенбургит, атокит) → Pd-Cu-Sn (станнопалладинит) → Pt-Fe-Cu-Ni (тетраферроплатина) → Pd-Ni-As (маякит) → Pd-As (палладоарсенид) → Pd-Pb(Bi) (звягинцевит, полярит) → Au-Cu-Pd (тетра-аурикуприд и аурикуприд) → Au-Ag сплавы.

2) Пирротиновые массивные руды в осевой части рудного тела Талнахской интрузии (рудник Скалистый) являются практически нефракционированными (рис. а,б) и уникальны по своим геохимическим особенностям. Ni/Cu отношения до 1,9. Руды содержат Ir+Ru+Rh до 12,3 г/т в валовом составе руды, что является самыми высокими содержаниями этих элементов для Норильских интрузий при отсутствии их минеральных форм. Согласно LA-ICP-MS результатам, платиноиды растворены в сульфидах, но наиболее значимым их концентратором является магматический пирит (Рис. 1в), который встречается только в нефракционированных рудах [2] и содержит Os – 5, Ir –7, Ru – 38, Rh – 36 (ppm). Значимые содержания этих элементов в сульфидном расплаве обусловлены высокими степенями частичного плавления мантийного субстрата, слабой степенью фракционирования в промежуточной магматической камере и внедрением примитивного сульфидного расплава на его место становления.

II. Месторождение Малетойваям является единственным на Камчатке, относящимся к высокосульфидному (HS) типу. Оно обогащено селеном и содержит уникальные соединения золота (системы Au-Te-Se-S), ранее не известные в природе, что предполагает особые условия его формирования [4]. Гидротермальное высокопробное и вторичное горчичное золото, оксиды золота Au–(Sb,As,Te,S)–O, калаверит $AuTe_2$, а также открытые нами и утвержденные IMA новые минералы малетойваямит $Au_3Te_4Se_6$, и гачингит Au(Te,Se) в ассоциации с сульфосолями (ватанабеит) относятся к продуктивной золоторудной стадии. Термометрические исследования флюидных

включений в кварце показали, что диапазон условий ее формирования составил: соленость 4,3 мас.% NaCl экв., температура – 255–245°C, давление 39–32 бар [5]. Минералы кристаллизовались из очень кислых растворов в окислительных условиях при высокой активности селена (log$fSe_2$ от –12,4 до –5,7) [4]. Выявлено, что Малетойваям (HS) отличается высочайшими концентрациями органических соединений (20,4 %) во флюидных включениях в кварце по сравнению с исследованными нами рудами Бараневское и Родниковое месторождений Камчатки низкосульфидного (LS) типа (0,9–1,6 % органических соединений). Показано, что горчичное золото, образованное по $AuTe_2$, не имеет потенциала для образования россыпей, поскольку оно распадается на частицы пыли, которые обогащают тонкие фракции окисленных руд, не доступные для гравитационного обогащения [6].

Исследования выполнены при финансовой поддержке базового проекта ИГМ СО РАН

1. *Tolstykh N., Krivolutskaya N., Safonova I., Shapovalova M., Zhitova L., Abersteinerd A.* Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization // Ore Geology Reviews, 2020. 122.

2. *Tolstykh N., Brovchenko V., Rad'ko V., Shapovalova M., Abramova V., Garcia J.* Rhodium, Ru and Ir partitioning in the Cu-poor IPGE massive ores, Talnakh intrusion, Skalysty mine // Minerals, 2021. V. 11, 1112

3. *Kalugin V., Gusev V., Tolstykh N., Lavrenchuk A., Nigmatulina E.* Origin of the Pd-Rich Pentlandite in the Massive Sulfide Ores of the Talnakh Deposit, Norilsk Region, Russia // Minerals, 2021. No.11, 1258

4. *Tolstykh N., Vymazalova A., Tuhy M., Shapovalova M.* Conditions of formation of Au-Se-Te mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoivayam ore field), Kamchatka, Russia // Mineralogical Magazine, 2018. V. 82. No. 3, P. 649-674.

5. *Sidorov E.G., Borovikov A.A., Tolstykh N.D. Bukhanova D.S., Palyanova G.A. and Chubarov V.M.* Gold Mineralization at the Maletoyvayam Deposit (Koryak Highland, Russia) and Physicochemical Conditions of Its Formation // Minerals, 2020. No.10, 1093.

6. *Tolstykh N., Palyanova G., Bobrova O., Sidorov E.* Mustard gold of the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam deposit, Kamchatka, Russia) // Minerals, 2019. No. 9, 489.

7. *Naldrett T.J.* Magmatic Sulphide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration; Springer: Berlin/Heidelberg/New York, NY, USA, 2004. 730 p.

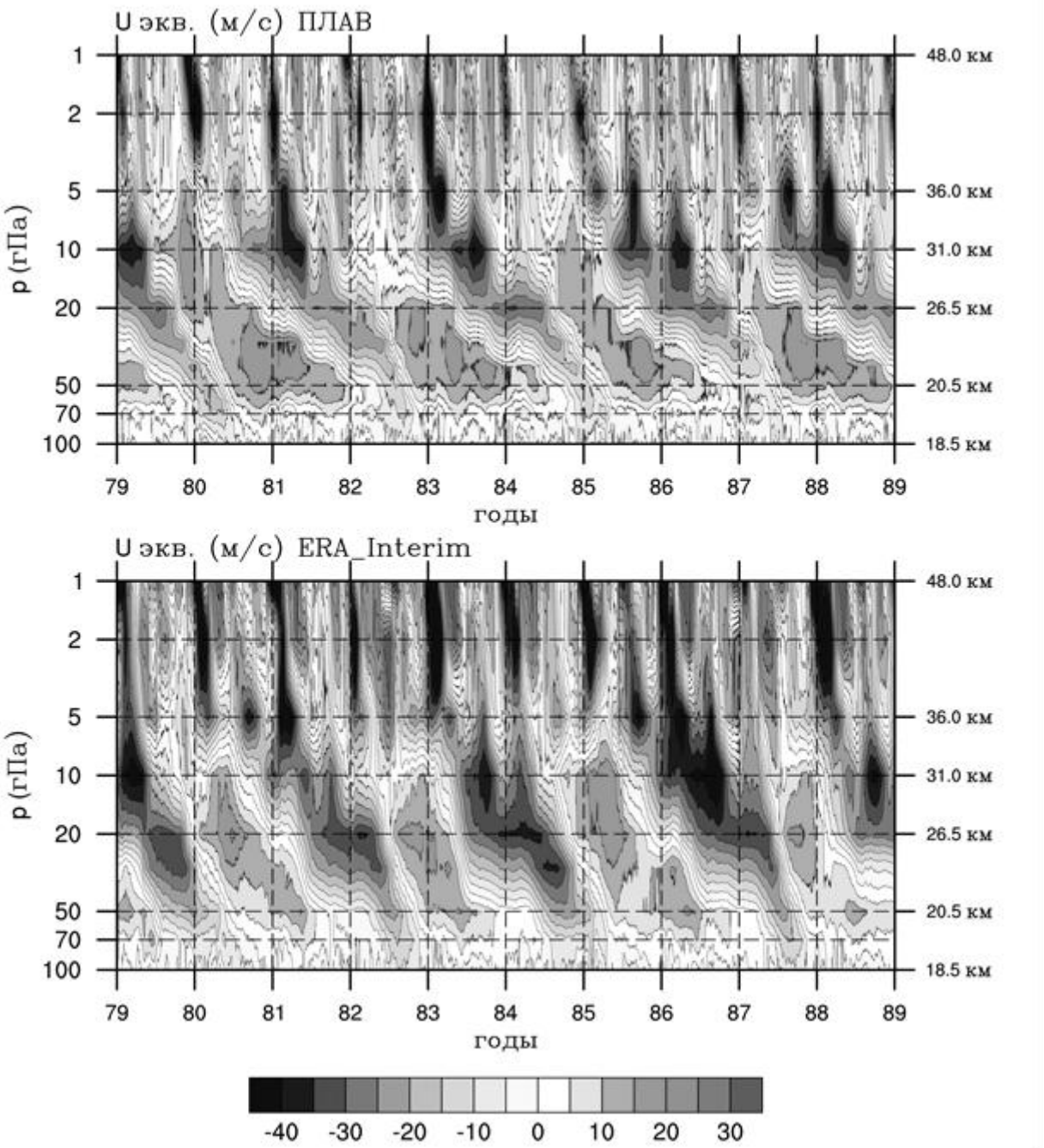



Рисунок. а – модельные кривые для интрузий норильского типа [7] с составами халькопиритовых руд из рудной линзы Южая-2 и пирротиновых руд из рудника Скалистый; б – кривые распределения рудных элементов для этих двух типов массивных руд; в – концентрации ЭПГ в пирротиновых рудах.

# ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ БЛАГОРОДНО-, РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*А.В. Травин*

ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН», *г. Новосибирск*
travin@igm.nsc.ru

Общими особенностями большинства крупных благородно-, редкометалльных месторождений являются эволюция флюидного режима, ведущая роль корово-мантийного взаимодействия, многоэтапность рудообразования. Это создает ряд проблем при реконструкциях истории формирования месторождений с использованием комплексного изотопного датирования и требует развития особого подхода. В первую очередь, приходится учитывать вероятность омоложения изотопных систем при наложенных термических воздействиях. В этом случае уместен переход к интерпретации наборов изотопных датировок в терминах термических историй, основанной на кинетических данных, что составляет суть термохронологического подхода [1]. Главной проблемой при определении возраста рудообразования благородно-металльных месторождений является необходимость подбора подходящих для этого минералов-геохронометров, принадлежащих к рудным парагенезисам, либо связанных с ними. Одним из вариантов ее решения является датирование по «законсервированному» в рудном кварце серициту методом $^{40}Ar/^{39}Ar$ ступенчатого прогрева. Опробование метода на ряде объектов [2] и сопоставление с результатами, полученными другими методами показало ряд преимуществ: а) в таком варианте, как правило, удается получить в $^{40}Ar/^{39}Ar$ спектре надежное плато; б) для исследуемых образцов могут быть установлены с помощью термобарогеохимических исследований физико-химические параметры формирования оруденения; в) однозначно устанавливается синрудный генезис датируемого серицита, что исключает унаследование изотопной метки ранних событий; г) в связи с тем, что серицит «законсервирован» в кварцевой матрице, он защищен от поздних наложенных тектонотермальных, флюидных воздействий.

В настоящей работе проведено сопоставление полученных по «законсервированному» в рудном кварце серициту результатов датирования этапов формирования крупнейшего по запасам золота (более 1500 т) Олимпиаднинского месторождения Енисейского кряжа [3] с изотопно-геохронологическими данными для вулканических ассоциаций рифтогенных структур [4, 5], коллизионных метаморфических [6, 7], гранитоидных [8–10] комплексов (рис.).

Для предрудных кварц-слюдисто-сульфидных метасоматитов, характеризующихся невысокими P-T параметрами (T – 220–325°C; P – 0.6–2.2 кбар), наблюдается близость $^{40}Ar/^{39}Ar$ датировок по биотиту, мусковиту с датировками биотитов (815–830 млн лет) из отобранных на разных участках Енисейского кряжа метапелитовых метаморфических пород. По всей видимости, через 20 млн лет после кульминации коллизионного метаморфизма произошло тектоно-термальное событие, связанное с активизацией крупных региональных разломов и оперяющих их структур в пределах Енисейского кряжа. На этом этапе произошла эксгумация метаморфических пород коллизионного этапа и формирование предрудных кварц-слюдисто-сульфидных метасоматитов. Датировки ранней кварц-золото-арсенопирит-пирротиновой ассоциации рудного этапа, характеризующейся увеличением P–T параметров, близки ко времени заложения неопротерозойских рифтогенных структур, формирования плагиориодацит-базальтовой

ассоциации и совпадают с возрастом коллизионного метаморфизма умеренных давлений. На основании данных о составе включений, что источником флюидов могли быть постмагматические гидротермальные растворы, которые поднимались с глубинных уровней магматических систем, активизировавшихся во время коллизионного события. Ранняя, основная золотоносная кварц-арсенопирит-пирротиновая ассоциация сменяется кварц-золото-сурьмяной. Три временных импульса проявления этой ассоциации, совпадают с возрастом формирования, в первую очередь, гранитов аяхтинского комплекса (Чиримбинский массив на территории месторождения), а также глушихинского, кутукасского комплексов, проявившихся в пределах Енисейского кряжа. Это позволило предположить, что на каждом из этапов происходила активизация частично расплавленного гранитного слоя на глубинных уровнях орогена и, в зависимости от степени влияния мантийных расплавов, – формирование гранитоидных массивов различного состава и поступление новых порций постмагматических гидротермальных растворов в рудное поле месторождения.


1. *Reiners P.W. at al.* // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 2005. Vol. 58. P. 1–18.
2. *Павлова Г.Г. и др.* // Геология и геофизика, 2008. Т. 49. № 7. С. 720–733.
3. *Гибшер Н.А. и др.,* // Геохимия. 2019. Т. 64. № 5. С. 548–553.
4. *Ножкин А.Д. и др.* // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 12. С. 1307–1320.
5. *Ножкин А.Д. и др.* // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 666–688.
6. *Лиханов И.И. и др.* // Доклады академии наук. 2010. Т. 412. № 6. С. 799–803.
7. *Лиханов И.И. и др.* // Доклады академии наук. 2010. Т. 435. № 3. С. 372–377.
8. *Верниковская А.Е. и др.* // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 3. С. 259–272.
9. *Верниковская А.Е. и др.* // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 5–21.
10. *Верниковская А.Е. и др.* // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 5. С. 576–594.

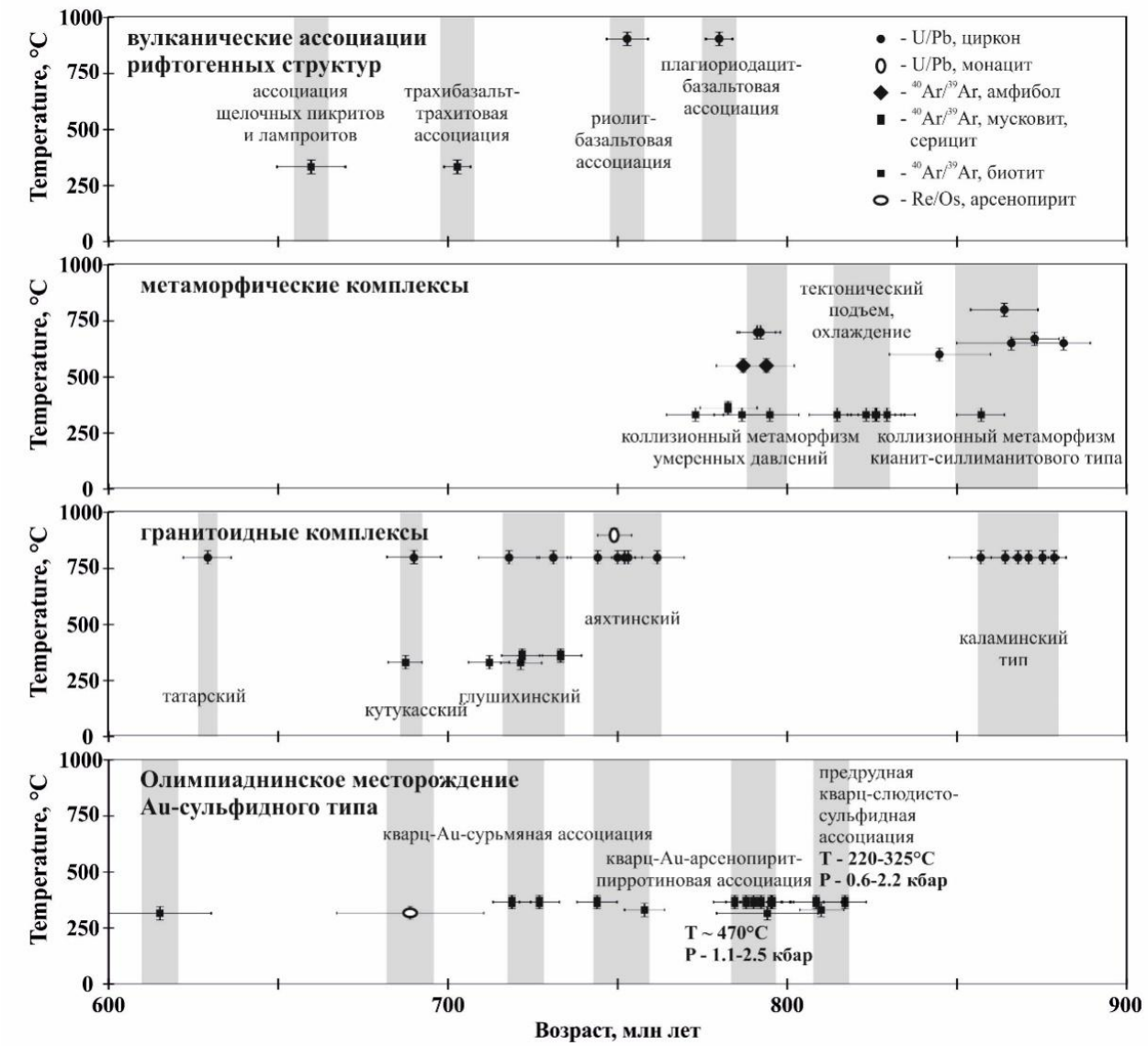



Рисунок. Сопоставление результатов $^{40}Ar/^{39}Ar$ датирования рудных ассоциаций Олимпиаднинского месторождения с изотопно-геохронологическими данными для вулканических ассоциаций рифтогенных структур, метаморфических, гранитоидных комплексов Енисейского кряжа. По оси Y отложена температура закрытия изотопной системы соответствующего минерала, метода, либо температура формирования

# РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ И ЛИТОСФЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЗДНЕМЕЗОЗОЙСКИХ ОРОГЕННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*В.Ю. Фридовский*

ФГБНУ «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН», г. *Якутск*
fridovsky@diamond.ysn.ru

Орогенные золоторудные месторождения (OGD) имеют важное экономическое значение. Их происхождение тесно связано с деформационными, метаморфическими и магматическими событиями в аккреционных орогенах [2, 3, 4]. Широкое развитие орогенные золоторудные месторождения получили в Верхояно-Колымской складчатой области (ВКСО) (Нежданинское, Наталка, Павлик, Дегдекан, Бадран, Дражное и другие) [1, 3]. Месторождения проявлены в Аллах-Юньском (АЮМП) и Яно-Колымском (ЯКМП) металлогенических поясах, а также Куларском ареале.

Среди орогенных золоторудных месторождений ВКСО выделяются раннеорогенный и позднеорогенный подтипы [5]. Раннеорогенный подтип месторождений ассоциирует с хрупко-пластичными шеар зонами листрического типа с контрастной вертикальной структурной зональностью и развит в АЮМП. Характерны птигматитовые золото-кварцевые жилы и вкрапленная золото-сульфидная минерализация. Месторождения формировались при фронтальном сближении плит палео-Тихого океана и восточной окраины северной Азии в субдукционно-аккреционной обстановке. Позднеорогенные жильно-штокверковые и вкрапленные месторождения локализуются в региональных транскоровых разломах или в структурах второго/третьего порядка. Комплексные структурные исследования в западной части ЯКМП в комбинации с наблюдениями в масштабах месторождения позволили предложить трехстадийную деформационную модель, выяснить кинематику, механизмы и этапы формирования рудоконтролирующих структурных парагенезисов золоторудных месторождений в контексте эволюции мезозойских орогенных поясов ВКСО. Позднеорогенные золоторудные месторождения образовывались в разнообразных геодинамических обстановках – аккреционно-коллизионной (ЯКМП) и субдукционно-аккреционной (АЮМП).

На основе данных по составу и свойствам флюидных включений в жильном кварце из месторождений Яно-Колымского металлогенического пояса конкретизированы параметры рудообразования, что позволило установить эволюцию гидротермальной системы. Отложение руд происходило в условиях относительно устойчивого среднетемпературного режима (от 215 до 300$^{o}$C), при значительной вариации давления от 0,25 до 1,2 кбар. Резкие колебания давления и, соответственно, скоростей потока флюида способствовали рудоотложению в контролирующих оруденение разломных системах. Состав флюида изменялся от низкосоленого (1±0.5 мас. % NaCl-экв.) водно-углекислотного на ранней стадии минералообразования до водно-углекислотно-метанового с умеренной соленостью (6–8.7 мас. % NaCl-экв.) на поздней стадии. Одновременно происходило увеличение концентрации хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов, а также рудогенных элементов.

Изотопно-геохимические данные позволили обосновать участие корово-мантийных процессов в рудообразовании на месторождениях ЯКМП. Выявлено сходство в изотопном составе пирита и арсенопирита в золото-кварцевых жилах и сопровождающих их пирит-

арсенопирит-серицит-кварцевых метасоматитах. Так, изотопный состав серы арсенопирита и пирита жильной минерализации изменяется соответственно от –2.1‰ до +2.4‰ и от –6.6‰ до +5.4‰ [3], а вкрапленной – соответственно от –2.1‰ до +4.4‰ и от –6.4‰ до +5.6‰. Гомогенный изотопный состав серы пирита и арсенопирита и других сульфидов из рудных жил и метасоматитов орогенных месторождений золота указывает на их формирование в ходе единого эволюционирующего гидротермального события. Средние величины $\delta^{34}S$, близкие к нулю, характерны для мантийных флюидов. Установленные начальные отношения изотопов осмия ($^{187}Os/1^{88}Os$)i золота изменяются от 0.1844 до 0.2475 и указывают на участие в рудообразовании фертильного сублитосферного источника. Формирование орогенных месторождений связывается с проникающими по зонам крупных разломов региональными флюидными потоками.

На основе новых датировок золоторудных (Ar-Ar, Re-Os) и магматических (U–Pb, SHRIMP-II) образований комплекса малых интрузий пересмотрены устоявшиеся представления о временных границах становления многих геологических объектов, обоснованы взаимоотношения минерализации с магматическими и тектоническими событиями на северо-восточной окраине Сибирского кратона [6]. Образование магматических пород комплекса малых интрузий происходило из единого смешанного источника с участием мантийной (OIB- и E-MORB-типа) и коровой, в том числе субдукционной компонент. Выделены три кластера (млн лет) – 141–151, 135–138 и 123–132, которые субсинхронны времени тектонотермальных событий, проявленных при гидротермальных процессах на орогенных золоторудных месторождениях западной части ЯКМП. Полученные титон-валанжинские Ar-Ar и Re-Os оценки возраста орогенных золоторудных месторождений сопоставимы со временем кристаллизации/остывания интрузивных пород основного, среднего и кислого составов комплекса малых интрузий (138–151 млн лет) аккреционно-коллизионного этапа развития восточной окраины Сибирского кратона. Тогда как третий этап (123–132 млн лет), вероятно, является отражением наложенных тектонотермальных событий в тылу Удско-Мургальского вулканоплутонического пояса.

1. *Горячев Н.А.* Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 143 с.

2. *Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В. и др.* Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданинского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений, 2007. Т. 49, № 2. С. 99–145.

3. *Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Викентьева О.В.* Благороднометалльная минерализация Адыча-Тарынской металлогенической зоны: геохимия стабильных изотопов, флюидный режим и условия рудообразования // Геология и геофизика, 2018. Т. 59 (10). С. 1586–1605.

4. *Чернышев И.В., Бортников Н.С., Чугаев А.В. и др*. Источники металлов крупного орогенного золоторудного Нежданинского месторождения (Якутия, Россия): результаты высокоточного изучения изотопного состава свинца (MC-ICP-MS) и стронция // Геология рудных месторождений, 2011. Т 53, № 5. С. 395–418.

5. *Fridovsky V. Y.* Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia //Ore Geology Reviews, 2018. Т. 103. С. 38–55.

6. *Fridovsky V.Yu., Yakovleva K.Yu., Vernikovskaya A.E. et al.* Geodynamic emplacement setting of Late Jurassic dikes of the Yana-Kolyma gold belt, NE folded framing of the Siberian craton: geochemical, petrologic, and U-Pb zircon data // Minerals, 2020. V. 10, №. 11. P. 1000.

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*А.Ю. Бычков*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова», *г. Москва*
bychkov@geol.msu.ru

Гидротермальные рудные месторождения являются важнейшим источником экономически значимых полезных ископаемых. Физико-химическая сущность гидротермально-метасоматических процессов заключается в перераспределении химических элементов в земной коре в результате взаимодействия подвижной флюидной фазы в ходе движения в проницаемых зонах горных пород. Многообразие типов руд, высокие содержания полезных компонентов делают актуальным исследование переноса и концентрирования элементов в гидротермальных системах.

В настоящее время стало очевидным, что многие закономерности переноса рудных компонентов и отложения руд определяются формами переноса компонентов и параметрами геохимических барьеров. Накоплено большое количество экспериментальных данных о формах переноса химических элементов в растворах с плотностью выше 0.5 г/см$^3$, однако транспортные возможности газовой фазы с низкой плотностью стали экспериментально изучаться только в последние десятилетия. В этих работах определены формы переноса в газовой фазе сурьмы и молибдена. Изучение состава сингенетичных флюидных включений с высокой и низкой плотностью также показало, что ряд металлов, в частности, золото в определенных условиях концентрируется в газовой фазе. Анализ газов фумарол и сольфатар современных вулканов также демонстрирует перенос элементов в газовой фазе. Нередки случаи находки самородного золота в продуктах вулканических эксгаляций. Многочисленные доказательства того, что малоплотная газовая фаза может содержать высокие концентрации металлов, ставят задачу физико-химического описания закономерностей переноса компонентов в этой среде.

В наших экспериментальных исследованиях показано, что малоплотные газы и надкритические флюиды являются такой же важной транспортной средой, как и растворы с высокой плотностью для мышьяка, меди и золота. Были экспериментально определены формы переноса этих элементов и их термодинамические характеристики. Установлено влияние сероводорода на распределение золота между газом и жидкостью в условиях гидротермального процесса. Перенос меди, молибдена, золота и мышьяка объясняет образование ассоциации, характерной для порфировых месторождений.

Показано, что физико-химические условия переноса элементов в гидротермальном процессе определяются фазовым состоянием многокомпонентного водного раствора. Диапазон условий предполагает различные агрегатные состояния: жидкую фазу с высокой плотностью, малоплотный газ и надкритический флюид. Закономерности растворимости минералов в этих средах существенно различаются. Если для плотных растворов термодинамическое описание растворимости минералов хорошо разработано, то для малоплотных флюидов нет единой модели. Нами получены уравнения для описания растворимости минералов в газовой фазе и распределения компонентов между жидкостью и газом.

Исследование флюидных включений однозначно указывает на важную роль гетерогенизации флюида в формировании рудных месторождений. Признаки кипения характерны для месторождений золота, и процесс кипения часто используется для

объяснения образования богатых руд. Для высокотемпературных грейзеновых месторождений кипение приводит к образованию рассолов с концентрацией солей до 60–70 мас.%. Такие рассолы приводят к образованию метасоматитов и могут переносить высокие концентрации рудных компонентов, в частности, вольфрама. Для порфировых систем характерна гетерогенизация надкритического флюида с образованием газовой фазы и рассола. Распределение компонентов между этими фазами определяет рудную специализацию таких месторождений.

Распределение компонентов между жидкостью и газом меняет термодинамические параметры системы и приводит к образованию геохимического барьера, на котором может происходить рудоотложение. В газовую фазу при кипении уходят кислые газы и водород, что приводит к повышению кислотности раствора и увеличению окислительно-восстановительного потенциала. В плотном растворе снижается содержание сероводорода, что повышает растворимость сульфидов. Потеря растворителя увеличивает концентрацию всех нелетучих элементов. В результате в гетерогенных системах происходит множество реакций, результат которых требует количественной оценки суммарного воздействия всех факторов. Такая оценка может быть проведена только путем количественных термодинамических расчетов и построения количественных моделей.

Методология исследования физико-химического моделирования заключается в формулировке гипотез, которые описывают причины рудообразования для конкретного объекта (охлаждение, взаимодействие вода-порода, кипение, смешение растворов и др.). Термодинамические расчеты дают возможность получить количественные критерии (равновесные минеральные парагенезисы, состав флюида, распределение компонентов между фазами). Для каждой геологической модели разрабатывается сценарий расчетов, и результаты должны быть верифицированы по независимым природным данным. Получение таких данных является важной геохимической задачей. Могут быть использованы, например, содержания редкоземельных элементов. Нами разработаны подходы к расчету распределения РЗЭ между минералами и флюидами на примере жильно-грейзеновых месторождений.

Результаты расчета моделей конкретных месторождений показали, что кипение не всегда является фактором рудоотложения. Так, для жильно-грейзеновых месторождений Акчатау (Казахстан), Иультин и Светлое (Чукотка, Россия) кипение не является фактором рудообразования, а отложение вольфрамита связано с процессами смешения магматогенного флюида с экзогенными водами.

Физико-химическая модель медно-молибденового месторождения Песчанка (Чукотка, Россия) позволила объяснить отложение руд и закономерности концентрирования меди, молибдена и золота. Результаты расчетов показали, что важнейшим фактором является распределение этих элементов между газом и жидкостью при расслоении флюида в ходе снижения температуры. При этом золото существенно меньше поглощается жидкой фазой, чем медь и молибден. Вынос золота из зоны рудообразования может объяснить генетическую связь медно-порфировых руд с эпитермальными месторождениями золота.

Результаты расчетов моделей гидротермальных месторождений воспроизвели первичную геохимическую зональность в рудном теле и вмещающих породах. Такой результат позволил использовать большой объем данных, накопленный при геохимических методах поисков полезных ископаемых для верификации. Дальнейшее развитие даст возможность применить теоретические методы для решения практических задач: оценки эрозионного среза месторождений и поиска слепых рудных тел с использованием надрудных ореолов.

# ПОЛИГЕННЫЕ РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*И.В. Викентьев*

ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, *г. Москва*
viken@igem.ru

Внимание к проблемам генезиса колчеданных месторождений обусловлено двумя главными причинами. (1) Открытые 45 лет назад современные гидротермальные поля с «черными курильщиками» представляют собой единственные эндогенные по природе системы, образующие скопления рудного вещества, сопоставимые по масштабам с месторождениями древних эпох. Одни из немногих они действовали на планете практически всю историю ее геологического развития, начиная с архея, и активно развиваются и поныне. (2) Они являются геодинамическим индикатором, поскольку маркируют островодужные условия, а состав их руд является отражением палеотектонической позиции. Урал и Рудный Алтай занимают особое место среди колчеданных месторождений мира – по их разнообразию, сохранности структур, по суммарным запасам цветных и, особенно, благородных металлов.

**Рудный Алтай** – область интенсивного девонского базальт-риолитового вулканизма (островодужного/заостроводужного). Он имеет здесь выраженную риодацитовую тенденцию, связанную с плавлением корового субстрата, сопровождающим рифтогенез окраины Сибирского континента. Синхронно с вулканизмом, в периоды его затухания в локальных депрессиях отлагались линзы серноколчеданных и медно-цинковых руд. Богатые полиметаллические руды были сформированы в поздневулканическое время в условиях перекрытия залежей известково-терригенными осадками. Обычно рудные тела тесно ассоциируют с экструзивно-субвулканическими телами риодацитов. В образовании локальных рудоносных структур ведущая роль принадлежала деформациям поперечного изгиба на фоне латерального растяжения. Месторождения на Р. Алтае приурочены к 4-м уровням (ems-$ef_1$, $ef_{2-3}$, $gv_2$, $gv_3$-$fr_1$). Слабонарушенные объекты представлены грибообразными и линзовидными залежами густовкрапленных руд, барит-полиметаллических (Лениногорский район) и Cu-Zn (в Прииртышье), с обогащенным Cu и Au жильным штокверком в лежачем боку, например, Риддер-Сокольное (750 т Au).

В *коллизионную стадию* (карбон) с переходом от режима субдукции к левосдвиговому тектоническому скольжению обособились массивные блоки и разделяющие их линейные зоны смятия – Иртышская и Северо-Восточная. В них первичные вулканогенные структуры были нарушены, а породы будинированы, смяты и рассланцованы. Например, на крупном Тишинском месторождении жесткие блоки-будины (~50×100 м) сложены породами с низкой пористостью, высокой плотностью, повышенными упруго-прочностными свойствами (микрокварциты, массивные смешанные туфы, риолиты). Они включены в матрицу пористых и пластичных сланцев. Выявлена метаморфическая геохимическая зональность: центральные участки таких блоков-будин характеризуются пониженными содержаниями Cu, Pb, Ag, а периферические и, особенно, торцевые (зоны растяжения) обогащены ими.

В исследовании колчеданных месторождений **Урала** особый акцент сделан на проблемах источника рудного вещества и флюидов, а также формах золота в сульфидах.

Колчеданные залежи образовались в два периода островодужного риолит-базальтового вулканизма в разобщенных Тагильской ($O_3$-$S_1$) и Магнитогорской ($D_{1-2}$) зонах. На тесную связь с вулканизмом указывает закономерная позиция рудных залежей в разрезах. В Магнитогорской зоне с более мощными проявлениями контрастного вулканизма и длительным развитием колчеданообразования выделено 3 наиболее продуктивных подуровня (ems, $ef_2$ и $ef_3$-$gv_1$).

Преимущественным развитием пользуются Cu-Zn месторождения *уральского* типа, в рудах которых Cu≥Zn (Гайское, Юбилейное и нек. др.) или же Zn>Cu (Учалинское, Узельгинское и др.). Средними и мелкими являются Cu-Zn-Pb-Au-баритовые месторождения, приближающиеся к типу *куроко* (Баймакский район и нек. др.) – в тыловых дугах, с преобладанием кислого магматизма, а также Cu-Co месторождения (близки *кипрскому* типу, преддуговая позиция). Месторождения залегают в осадочно-вулканогенных сериях, образование их обычно связано с перерывами в вулканических извержениях.

Колчеданные залежи были сформированы в местах разгрузки металлоносных растворов на морское дно или в корневых частях гидротермальной системы. Исследованиями расплавных включений и флюидных включений магматической воды во вкрапленниках кварца кислых вулканитов методом LA-ICP-MS нами впервые установлена высокая насыщенность металлами магматического флюида и сосуществующего магматического расплава (с наибольшим относительным обогащением первого Cu и Au). Гидротермальные флюиды преимущественно хлоридного состава (2–8 мас.% NaCl экв.), отложили основную массу руды при t=200–400°C и P=0.3–1 кбар. Основными их компонентами были преобразованная морская и ювенильная вода. Судя по давлениям в 0.5–1 кбар (по флюидным включениям), на части месторождений (включая самые крупные объекты) образование основной массы руд шло существенно ниже морского дна. Реальность заметного вклада магматического флюида подтверждают данные термодинамического моделирования. Данные по изотопии (Sr, S, H, O, C) и по включениям гидротермальных флюидов говорят об их смешанной или преобладающей глубинной природе. По изотопии Pb как Урала, так и Рудного Алтая установлена важная роль участия мантийного вещества.

Выявлены условия, благоприятные для образования *крупных* колчеданных залежей. Это обстановки растяжения – в зонах задугового спрединга и кальдерах вулканов. В палеоостроводужной обстановке размещение месторождений обычно определялось положением центров длительной эндогенной активности, что обеспечивало существенную продолжительность функционирования локальных гидротермальных систем.

На большинстве крупных колчеданных объектов Урала и Рудного Алтая отмечается влияние *регионального метаморфизма* – в основном пренит-пумпеллиитовая и низы зеленосланцевой фации, но местами до эпидот-амфиболитовой фации. Большинство крупных залежей представлено плито- и линзообразныеми рудными телами варьирующей мощности с раздувами и пережимами; они слагают крутые и субвертикальные псевдомоноклинальные структуры. На сильно преобразованных месторождениях происходит изменение текстурно-структурных характеристик руд, и резко возрастает роль сплошных разностей. Типичными признаками метаморфизма являются полосчатые и гнейсовидные текстуры руд, характерные для приконтактовых зон крупных линз сплошных сульфидных руд. В них появляются пирротин, магнетит, редкие минералы Au, Ag, As, Sb, Sn, Ge, Bi, Te, Se, Co, а также Zn-шпинель и цельзиан; в сульфидах уменьшается содержание элементов-примесей; укрупняется самородное

золото, переходящее из «невидимой» формы в микронные и более крупные выделения самородного золота и Au-Ag теллуридов.

Наиболее преобразованы руды месторождений, испытавших в тепловом поле гранитов *контактовый метаморфизм*, вплоть до частичного плавления и регенерации. В рудах проявлены пегматоидная, графическая, симплектитовая, порфиробластовая структуры. Таким образом, на примере крупнейших колчеданоносных провинций – Урала и Рудного Алтая доказано определяющее влияние метаморфизма на морфологию залежей, структурно-текстурные особенности, минеральный состав и обогатимость руд.

# РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ КРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ РОССИИ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ, УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, НОВЫЕ ПОДХОДЫК ПРОГНОЗИРОВАНИЮ

*А.В. Волков*

*ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН», г. Москва*
tma2105@mail.ru

Определение минеральной (рудообразующей) системы по мировым источникам [1–4] аналогична концепции нефтяной системы, но из-за особенностей природы рудных месторождений и вмещающих пород минеральная система гораздо более разнообразна и сложна. Для формирования рудного месторождения требуется источник металлов, агенты транспортировки (флюиды или магмы) и область осаждения или накопления руд. Объединяющая все эти процессы рудообразующая система включает все геологические и геодинамические факторы на всех масштабных уровнях, которые контролируют возникновение, развитие и сохранение рудных месторождений. В таких системах принято выделять корневую зону (область магмо- и флюидо-зарождения), зону транспорта (тепло-массопереноса) и зону концентрированного рудоотложения. Для изучения, как правило, доступна лишь зона рудоотложения. Под рудообразующей системой мы, вслед за Д.В. Рундквистом [5], понимаем комплекс взаимосвязанных процессов генерации рудоносных флюидов, их миграции к поверхности и разгрузки на геохимических барьерах определяющих формирование аномальных скоплений полезных ископаемых.

На территории России выделены 8 главных рудообразующих систем стратегических металлов [6]: расслоенных интрузивов основных пород (магматическая базитовая и ультрабазитовая); скарново-порфировая и порфирово-эпитермальная; орогенная (в том числе связанная с интрузивами гранитоидов); связанная с щелочными гранитами; ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов; колчеданно-вулканогенная и осадочно-вулканогенная; осадочных бассейнов; россыпей и кор выветривания. Для каждой рудообразующей системы характерны свои минеральные типы месторождений стратегических металлов, отличающиеся набором основных и важнейших попутных компонентов (в том числе и критических) и по технологическим свойствам руд.

Современные прогнозно-металлогенические построения невозможны без подготовки ГИС-проекта, сочетающего картографические материалы и базу данных месторождений полезных ископаемых. При пространственно-статистическом ГИС-анализе применяются известные методические приемы, заложенные в аналитический аппарат ARCMAP, MAPINFO и других аналитических систем, а также разработанные нами новые методические подходы.

В ходе исследований была подготовлена база данных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов, состоящая из связанных между собой информационных блоков, характеризующих примеры минеральных месторождений, геологическую среду их размещения, интегральные модели, отражающие условия рудообразования и геодинамические обстановки развития рудообразующих систем. В базу данных включены более 18 000 рудных объектов разного ранга, от рудопроявления до крупных месторождений, расположенных на территории России, среди которых насчитывается около 8 тысяч золоторудных объектов, медных – более

тысячи, свинцово-цинковых – около 2 тысяч и редкометалльных – более тысячи. Месторождений, в рудах которых стратегические высокотехнологичные металлы являются основными и попутными компонентами, насчитывают менее тысячи двухсот, из них около двухсот – крупные. В химический состав руд месторождений входят Ag, Al, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cs, Cu, Ga, Ge, Hf, Hg, In, La, Li, Nb, Rb, REE, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zr. На основе базы данных составлена карта основных месторождений высокотехнологичных критических металлов на территории России.

Для ГИС-анализа пространственных соотношений геологической структуры и геодинамических обстановок формирования месторождений стратегических металлов России использованы результаты современных исследований литосферы на основе гравитационных данных, полученных космическим аппаратом GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*): глобальные карты глубины поверхности Мохо, мощности и строения осадочного чехла, модель CRUST1.0 [7]. В докладе результаты этого анализа продемонстрированы на примере Pb-Zn-месторождений MVT, SEDEX и VMS типов, а также месторождений золота Карлинского типа.

Таким образом, в результате исследований: выделены главные рудообразующие системы – источники стратегических металлов; создана база данных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических и высокотехнологичных металлов России; подготовлены геолого-генетические модели, а на их основе прогнозно-поисковые модели крупных месторождений стратегических металлов; разработаны новые подходы прогнозированию крупных месторождений стратегических металлов, в том числе на основе данных космического аппарата GOCE, позволяющих использовать элементы глубинного строения земной коры в прогнозно-поисковых моделях; составлена серия прогнозно-металлогенических карт территории Арктической зоны и Востока России; внесен крупный вклад в развитие геологии рудных месторождений активных континентальных окраин российской части Тихоокеанского рудного пояса.

1. *Pirajno, F.* Hydrothermal processes and mineral systems. Springer, 2009, 1250 p

2. *Joly, A., Porwal, A., McCuaig, T.C., Chudasama, B., Dentith, M.C., Aitken, A.R.A.*, Mineral systems approach applied to GIS-based 2D-prospectivity modeling of geological regions: Insights from Western Australia // Ore Geology Reviews. 2015. Vol. 71. P. 673–702.

3. *Hagemann, S.G., Lisitsin, V., Huston, D.L.* Mineral system analysis: Quo Vadis // Ore Geology Reviews. 2016. Vol. 76. P. 504–522.

4. *Hagemann, S.G., Cassidy, K.F.* Archean orogenic lode gold deposits // Rev Econ Geol. 2000. Vol.13. P. 9–68.

5. *Рундквист Д.В.* Пульсационная гипотеза С.С. Смирнова в свете новых данных о процессах рудообразования // Проблемы региональной металлогении и эндогенного рудообразования. Л.: ВСЕГЕИ, 1968. С. 46–66.

6. *Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 68. № 2. С. 97–119.

7. *Волков А.В., Галямов А.Л., Савчук Ю.С.* Применение моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, созданных на основе гравитационных данных спутника ГОСЕ, в металлогеническом анализе // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С.41–50.

# СИБИРСКИЕ ТРАППЫ И PGE-Cu-Ni МЕСТОРОЖДЕНИЯ

***Криволуцкая Н.А.***

*ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН», г. Москва*

nakriv@mail.ru

Магматические месторождения, связанные с ультрабазит-базитовыми комплексами, являются главными поставщиками платиновых металлов (PGE) и никеля на мировой рынок. Среди них Норильские месторождения занимают особое место, характеризуясь одновременно огромными запасами металлов и специфическим геологическим строением: они связаны не с крупными PR плутонами, что типично для других месторождений мира, а с маломощными телами габбро-долеритов молодой (250 Ma) Сибирской трапповой провинции. Главной их особенностью является большая мощность сульфидных руд, составляющих до 15–25% объема силикатных пород; что остро ставит вопрос об источнике серы. Для объяснения генезиса руд предлагаются две главные гипотезы: привнос готовых сульфидов в камеру кристаллизации пикритовыми магмами с повышенным содержанием летучих [1] и их образование *in situ* за счет взаимодействия протекающей к поверхности толеитовой магмы с вмещающими ангидритсодержащими породами [2]. Последняя модель получила всемирное признание [3]. Учитывая геологическое положение месторождений, встает закономерный вопрос: являются ли крупные Cu-Ni месторождения закономерным итогом развития любой трапповой системы или они образовались случайно? Для ответа на него необходимо оценить взаимоотношения рудоносных интрузивов с базальтами, масштаб и роль ассимиляции в образовании сульфидов и состав родоначальных магм, сформировавших рудоносные массивы.

Первый этап наших исследований включал тестирование этих двух предложенных моделей, т.е. рассмотрение указанных выше вопросов. Несмотря на близость редкоэлементного и изотопного состав интрузивов и базальтов, они не связи между собой, что показано нами на примере Октябрьского месторождения [4]. Идея о заимствовании серы из вмещающих пород базируется на тяжелом изотопном составе серы в норильских рудах (в среднем $\delta^{34}S$=12 ‰) [5]. Но нами такие же сульфиды обнаружены и в Дюмталейском массиве, имеющем мантийное происхождение [6]. И, наконец, нами были получены данные о составах родоначальных расплавов путем подсчета средневзвешенного состава рудоносных интрузивов, моделированием с помощью геохимической термометрии (ЭВМ модель «Комагмат») и изучением расплавных включений в ранних ликвидусных фазах. В результате установлено, что составы магм рудоносных массивов близки к составам типичных внутриплитным магмам (с немного повышенным содержанием MgO до 10–12 мас.%), включая концентрации летучих компонентов. Таким образом, ни одна из современных моделей образования месторождений, построенная только на изучении внутрикамерных процессов, полностью не отражает реальную геологическую ситуацию.

Поэтому мы перешли к построению собственной модели образования месторождений. Для начала решили выяснить особенности тектоно-магматической эволюции Норильского района по сравнению с другими областями провинции - Маймеча-Котуйской, Западного и Центрального Таймыра, а также рек Кулюмбэ, Нижней и Подкаменной Тунгусок, Ангары, Витима. В процессе многолетних работ нами были получены составы (главные и редкие компоненты, XRF+ICP-MS) магматических пород

Сибирской провинции (2480 образцов), позволившие сделать вывод о значительно большем разнообразием составов северных районов по сравнению с южными [**7**]. Это обусловлено проявлением в районе Енисей-Хатангского прогиба как рифтогенного, так и платформенного (собственно траппового) магматизма одновременно, а не последовательно, как это предполагалось ранее.

Вторым интересным результатом исследований явилось обнаружение мантийных пород с тяжелой серой, как в Дюмталейском массиве, так и в других эффузивных и интрузивных породах мантийного генезиса, распространенных на южном Таймыре и севере Сибирской платформы. Эти данные опровергают заимствование магмами серы *in situ* из окружающих ангидритов.

На основании полученных результатов нами выдвинута новая гипотеза образования месторождений севера Сибирской провинции из мантийного резервуара, обогащенного тяжелой серой. При непосредственном поступлении мантийных магм, содержащих сульфиды, в верхние части земной коры образуются мелкие месторождения никеля и платиновых металлов (как это имеет место на Таймыре). В случае длительного, постепенного дополнительного накопления в сульфидов в нижней части коры и их дальнейшей транспортировки трапповыми магмами в приповерхностные условия образуются крупные и уникальные месторождения Норильского района [**7**]. Обогащенность мантийного резервуара тяжелой серой могла иметь место в результате коллизии Карского континента с Сибирским кратоном. Таким образом, состав исходной магмы не имел решающего значения в образовании месторождений, а их появление обусловлено сочетанием ряда геологических процессов, приводящих к концентрированию и переносу сульфидов в камеру кристаллизации. Дальнейшее развитие процесса формирования руд обусловлено внедрением, как правило, нескольких порций магм, что показано нами наиболее наглядно для Масловского и Октябрьского месторождений [**7**]. Условия фракционной кристаллизации отличались в рудоносных и безрудных массивах, что привело к разной эволюции составов оливинов и пироксенов, выраженной в различном накоплении в них редкоземельных элементов и титана [8], что может рассматриваться как локальный поисковый критерий при поисках богатых руд.


1. *Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М. и др*. Геология и рудоносность Норильского района. М.: Недра, 1988. 279 с.

2. *Радько В.А.* Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика, 1991, № 11. с.19–27.

3. *Naldrett A.J.* Fundamentals of Magmatic Sulfide Deposits // Reviews in Economic Geology, 2011. v.17, P.1–50.

4. *Krivolutskaya N., Gongalsky B., Kedrovskaya T., Kubrakova I, Tyutyunnik O., Chikatueva V., Bychkova Ya., Kovalchuk E., Yakushev A., Kononkova N.* Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia: Evidence of a Closed Magmatic System //Mineralium Deposita, 2019. v. 54, P. 611–630.

5. Grinenko L.N. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbrodolerite intrusions of the northwest Siberian platform // International Geology Review, 1985/ v.27, P. 695–708.

6. *Криволуцкая Н.А.* Мантийная природа изотопно-тяжелой серы в рудах Норильских месторождений // Доклады Акаемии наук, 2014. т. 454, № 3, С. 319–321.

7. *Krivolutskaya N., Latyshev A., Dolgal A., Gongalsky B., Makareva E., Makarev A., Svirskaya N., Bychkova Ya., Yakushev A., Asavin A.* Unique PGE–Cu–Ni Noril'sk Deposits, Siberian Trap Province: Magmatic and Tectonic Factors in Their Origin // Minerals, 2019. V.9, № 1, Art. 66.

8. *Krivolutskaya N.A., Sobolev A.V., Snisar S.G., Gongalskiy B.I., Hauff B., Kuzmin D.V., Tushentsova I.N., Svirskaya N.M., Kononkova N.N., Schlychkova T.B.* Mineralogy, geochemistry and stratigraphy of the Maslovsky Pt–Cu–Ni sulfide deposit, Noril'sk Region, Russia: Implications for relationship of ore-bearing intrusions and lavas // Mineralium Deposita, 2012.V.47, P.69–88.

# МЕСТОРОЖДЕНИЯ И РУДЫ МАРГАНЦА: ГЕНЕЗИС, КЛАССИФИКАЦИЯ, ГЕОХИМИЯ ИЗОТОПОВ ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$)

*В.Н. Кулешов*

ФГБУН «Геологический институт РАН», *г. Москва*
vnkuleshov@mail.ru

Марганцевые руды в России в настоящее время относятся к третьей группе дефицитных полезных ископаемых, внутреннее потребление которых полностью обеспечивается импортом. Марганец входит в перечень стратегических видов минерального сырья, утвержденный распоряжением Правительства РФ от 16.01.1996 № 50-р. [1]. В связи с этим, фундаментальные исследования процессов формирования месторождений и генезиса руд марганца имеет критическое значение для развития ресурсной базы марганца и черной металлургии в Российской Федерации.

Понимание фундаментальных процессов формирования руд и образования самих месторождений дает базовые научные основы при поисках новых месторождений марганца.

Автором настоящего сообщения проведены полевые и лабораторные исследования руд известных месторождений ряда стран мира: России (Порожинское, Усинское, Улутелякское и др.), Грузии (Чиатурское, Квирильское), Украины (Никопольское, Большетокмакское), Австралии (Грут-Айленд), Африки (ЮАР, Габона, Ганы) и др.

1. На основании изучения химического и изотопного ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) состава карбонатных марганцевых руд установлен ряд генетических особенностей, позволяющих сделать прогнозные оценки обнаружения и масштабов возможного рудообразования марганца:

– Собственно осадочные месторождения марганца отсутствуют. Природные карбонаты марганца не образуются седиментационным (хемогенным или биогенным) путем, т.е. выпадением в осадок из толщи воды в изотопно-равновесных условиях с бикарбонатом морской воды.

– Первичные марганцевые руды известных месторождений и рудопроявлений образованы в морских условиях. Карбонатные марганцевые руды представлены двумя генетическими типами, образованными в условиях диагенеза и катагенеза. В практическом отношении это значительно расширяет круг поисковых критериев на марганцеворудное сырье.

– Общей закономерностью образования карбонатов марганца в условиях раннего диагенеза является непременное участие в этом процессе микробиально окисленного углерода органического вещества, а для постраннедиагенетических стадий (этапов) литогенеза – изотопно легкой углекислоты, образованной при метаморфизме (деструкции) органического вещества в условиях погружения осадочных толщ на глубину осадочно-породного бассейна (стратисферы) и в разные фазы нефте- и газогенерации.

– Концентрация марганца до размеров месторождений происходит: 1) в экзогенных условиях земной коры – на границах раздела атмосфера–порода (зона гипергенеза); 2) на осадочно-диагентическом (ранний диагенез), и в меньшей степени – 3) на последующих этапах литификаци исходного осадка и преобразования осадочной или вулканогенно-осадочной породы (диагенез погружения, конкрециеобразование).

2. Предложена новая генетическая классификация месторождений марганца (с модельными примерами известных месторождений) [2]:

− осадочно-диагенетические месторождения осадочно-породных бассейнов (модельные примеры: Никопольский марганцеворудный бассейн, Украина; Мангышлакское, Казахстан; Чиатурское, Грузия);

− месторождения гидротермально-осадочного и гидротермального генезиса (модельные примеры: гидротермально-осадочные месторождения Южного Урала, Парнокское месторождение железо-марганцевых руд);

− гидротермальные месторождения марганца (модельные примеры: месторождения Казахстана);

− эпигенетические (катагенетические) месторождения (модельные примеры: месторождение-супергигант – марганцеворудное поле Калахари, ЮАР; Улутелякское и Усинское месторождения, Россия);

− железомарганцевые месторождения железисто-кремнистых формаций (модельные примеры: месторождения Австралии, Пилбара);

− метаморфизованные месторождения марганца (модельные примеры: Нсута, Гана);

− месторождения кор выветривания (модельные примеры: Моанда, Габон; Грут-Айленд, Австралия);

− выделен новый генетический подтип карбонатов марганца месторождений кор выветривания – карбонатные марганцевые руды карстовых депрессий (модельные примеры: Мазульское и Порожинское, Красноярский край) [3, 4].

3. Предложена модель распределения месторождений марганца во времени (геологическом) и пространстве (в пределах палеоматериков и современных континентов): марганценакопление в геологическом прошлом происходило в осадочно-породных бассейнах в тесной связи с эволюцией континентов и биотическими событиями (массовые вымирания организмов). Выделено семь важнейших фаз накопления марганцевых пород и руд в истории формирования литосферы Земли: ранне-, средне- и позднепротерозойская, нижне-среднепалеозойская, позднепалеозойская, позднемезозойская и раннекайнозойская [2].

4. Геохимия редкоземельных элементов (РЗЭ) – является перспективным направлением в области изучения марганцевых руд; имеет важное значение для понимания условий образования и источника рудного вещества. Нами получены новые данные по рудам некоторых известных месторождений марганца:

− в рудах месторождения-супергиганта марганцеворудного поля Калахари (ЮАР) впервые установлена прямая корреляционная зависимость содержания марганца с европиевой аномалией. Это свидетельствует о важной роли глубинного (гидротермального) источника марганца в формировании месторождения [5];

− в карбонатных рудах Чиатурского месторождения (Грузия), обравшихся в восстановительных условиях раннего диагенеза, впервые выявлена отрицательная цериевая аномалия. Это является одним из важных моментов в понимании геохимии РЗЭ в процессах литогенеза и формировании карбонатов марганца.

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 г.». М.: ФГБУ «ВИМС». 2021. 491 с.

2. *Kuleshov V.* Isotope Geochemistry: The Origin and Formation of Manganese Rocks and Ores. (Edited J. Barry Maynard) Amsterdam: Elsevier. 2017. 427 p.

3. *Кулешов В.Н., Жуков И.Г., Брусницын А.И.* Изотопные ($\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$) и генетические особенности карбонатов марганца Мазульского месторождения (Красноярский край) // Литология и полезные ископаемые, 2017. № 1. С. 60–71.

4. *Кулешов В.Н., Свиридов Л.И., Петров О.Л.* Особенности генезиса карбонатов марганца Порожинского месторождения (Енисейский кряж, Красноярский край) // Литология и полезные ископаемые, 2021. № 3. С. 257–276.

5. *Варенцов И.М, Кулешов В.Н.* Рассеянные элементы – маркеры обстановок формирования гигантских месторождений марганцевых и железных руд площадей Калахари и Постмасбург (ЮАР): Сообщение 1. Марганцеворудная площадь Калахари // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 4. С. 364–386.

# ЗАДАЧИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ НАУКИ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОПЕРЕХОДА

*И.В. Шпуров*

ФБУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых», *г. Москва*
shpuroviv@icloud.ru

Перед угрозой глобального климатического кризиса мир выбирает сохранение природы для нынешнего и будущих поколений.

17 Целей Устойчивого Развития, провозглашенных ООН – это глобальный список мероприятий, которые необходимо провести для ликвидации нищеты, решения проблем изменения климата, обеспечения доступа всего человечества доступной и недорогой энергией. У граждан всего мира должен быть доступ к недорогой и чистой энергии.

Мы не разделяем энергию, когда используем ее в быту. Источниками энергии может быть природный газ, водород, солнце, ветер. Нам важно, чтобы энергия была, и была чистой.

Мировые энергетические рынки вступили в состояние перехода от энергетики, основанной на использовании ископаемых углеводородных ресурсов, к предпочтительному использованию энергоресурсов с низким углеродным следом. Согласно прогнозу US Energy Information Administration, возобновляемая энергетика по сравнению к сегодняшнему дню увеличится в 2 раза.

Но если говорить о газе, то для того, чтобы обеспечить нас доступной энергией, газ останется на том же уровне в процентном отношении, а в абсолютном значении увеличится на 35 %.

Одними из главных инвесторов в чистую энергию должны быть компании топливно-энергетического сектора. И они декларируют это в своих стратегиях развития. Однако на самом деле в период с 2008 по 2017 гг. всего лишь от 0,5 до 4% от общих инвестиций ведущих нефтегазовых компаний связаны с инвестициями в возобновляемые источники энергии. В действительности компании вкладываются в основном в процессы, способствующие снижению операционных затрат, а также инвестируют в развитие зеленых, чистых технологий в традиционной энергетике.

Тем не менее, возобновляемые источники – это серьезный дополнительный источник энергии, который позволит обеспечить увеличивающуюся потребность народов мира в энергии – недорогой и доступной. По прогнозу до 2050 года производство наземной энергетики увеличится в 10 раз, оффшорной в 43 раза, солнечной – в 17 раз.

Развитие возобновляемых источников связано с развитием добычи критических минералов. И они потому и называются критическими, что от них зависит развитие альтернативной энергетики. Предполагается, что для развития возобновляемых источников энергии добыча лития должная вырасти в 42 раза. А литий, как правило, это источник, который добывается из гидроминерального сырья. И, например, в 20 раз должно вырасти потребление кобальта, никеля и графита, и это тоже ископаемые источники, разведка и добыча которых тоже связана с выделением $CO_2$ в процессе геологоразведки и добычи. И все это нам надо учитывать и объективно сравнивать углеродный след при производстве различных видов энергии. И поэтому нам надо учитывать весь цикл производства энергии различными источниками, в том числе разведку и добычу критических материалов и затем их утилизацию.

В итоге мы видим позитивный процесс снижения издержек производства электроэнергии различными источниками. Но мы не до конца понимаем общий объем выделения CO2 при производстве этих видов энергии. Поэтому нам представляется необходимым сделать такой важный шаг и произвести объективное сравнение чистоты и эффективности различных видов энергии путем сопоставления так называемого **индекса чистой энергии**. Предлагаем ввести этот термин в рамках Системы управления ресурсами ООН (UNRMS) для того, чтобы при производстве каждого вида энергии, мы было возможно выполнить оценку стоимости единицы чистой энергии, производимой различными ее источниками, на всем цикле производства (разведка, добыча, утилизация). Для того, чтобы достигать баланса между различными видами энергии необходимо объективное сравнение «чистоты» и эффективности различных видов энергии, которое возможно только путем сопоставления «индексов чистой энергии» (ИЧЭ – стоимость единицы «чистой» энергии, производимой различными ее источниками). Это позволит взглянуть объективно на будущее энергетики в целом и объективно подходить к достижению Целей устойчивого развития.

Такой показатель как индекс чистой энергии очень важен для различных стейкхолдеров: и для государства, и для бизнеса, и мы сейчас стоим на пороге того, что Рамочная классификация ресурсов ООН (РКООН) и Система управления ресурсами ООН (СУРООН) станут главным базисом для оценки и сравнения всех видов энергии и будут способствовать продвижению к экономике замкнутого цикла в использовании ресурсов.

1. Рамочная классификация ресурсов Организации Объединенных Наций. https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/UNFC_ES61_Update_2019.pdf

2. Система управления ресурсами Организации Объединенных Наций: руководящие принципы и структура. https://unece.org/sites/default/files/2021-08/ECE_ENERGY_2021_21_r.pdf

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ НАФТИДОГЕНЕЗА И МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ПРОГНОЗА НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Бурштейн Л.М.*

ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука» СО РАН, *г. Новосибирск*
levi@ipgg.sbras.ru

В 20–21 веках нефтегазовая геология, осадочно-миграционная теория нафтидогенеза, методология и методики прогноза нефтегазоносности развивались исключительно успешно. Были открыты и освоены крупнейшие нефтегазоносные провинции и месторождения углеводородов в России и по всему миру, установлены основные фундаментальные закономерности нафтидогенеза, решены многие теоретические и прикладные задачи. Значительный вклад в развитие нефтегазовой геологии внесла сибирская школа геологов-нефтяников, созданная ак. А.А. Трофимуком и развивавшаяся его последователями – ак. А.Е. Конторовичем, ак. В.С. Сурковым, чл.-корр. И.И. Нестеровым и др. Перечень практических и теоретических проблем, определяющих развитие теоретических основ нефтегазовой геологии широк, но среди них можно выделить несколько основных направлений.

После создания ресурсной базы углеводородного сырья в Волго-Уральской и Западно-Сибирской нефтегазоносных провинциях центр поисковых работ сместился в Восточную Сибирь. Было понятно, что нефть Восточной Сибири будет древней (кембрийской – ак. А.Д. Архангельский, ак. И.М. Губкина; докембрийской – М.А. Усов). Эту идею развивали ак. А.А. Трофимук и ак. А.Э. Конторович. В мире не было опыта оценки запасов и ресурсов месторождений с возрастов более 300–400 млн лет, а на Сибирской платформе пришлось оценивать ресурсы объектов, которые залегают в слоях с возрастом до 1.5 млрд лет. Существовали представления, что существующие методы оценки перспектив нефтегазоносности, для этих отложений будут непригодны. Для решения этой проблемы, на основе исследования влияния возраста осадочного выполнения на величину плотности ресурсов УВ в крупных осадочных бассейнах, был создан спектр прогностических моделей [1] в последствии широко используемых при оценках территорий Сибири и арктических акваторий и вошедших в официальное методическое руководство по количественной оценке перспектив нефтегазоносности.

Одной из важнейших характеристик структуры ресурсов УВ является распределение их скоплений по крупности. Информация о размерах еще не выявленных скоплений позволяет более обоснованно и объективно подойти к планированию ГРР на нефть и газ. Работами преимущественно отечественных исследователей (В.И. Шпильман, ак. А.Е. Конторович, В.И. Демин и др.) было показано, что распределение скоплений УВ достаточно хорошо описывается так называемым усеченным распределением Парето [1]. Созданный на основе этой закономерности математический аппарат использовался для прогноза уникальных и крупных скоплений УВ. Сейчас, когда во многих хорошо изученных бассейнах эти классы скоплений выявлены, важным становиться прогноз числа мелких и мельчайших скоплений и сосредоточенных в них ресурсов УВ. В последние годы такой прогноз выполнен для бассейнов Западной и Восточной Сибири, Татарии, Башкирии и других районов [2, 3]. С позиций теории так же было необходимо разобраться в механизмах возникновения распределения скоплений УВ по крупности и установить, как на него влияют характеристики вмещающих отложений. Предложенная

математическая модель [4] изменения размеров скопления УВ в следствии процессов аккумуляции и диссипации позволила объяснит природу распределения скоплений по крупности и связать его параметры с характеристиками осадочного выполнения [5].

Одним из центральных направлений исследований теоретической геологии нефти и газа является моделированием процессов нефте- и газообразования, позволяющее реконструировать историю нафтидогенеза в конкретных осадочных бассейнах. В рамках этого направления предложена модель катагенеза рассеянного органического вещества, учитывающая новообразование неуглеводородных компонент, выполнено первое определение эффективных начальных кинетических параметров керогенов баженовской свиты и ее аналогов с Русской платформы [6]. Модели преобразования рассеянного органического вещества в катагенезе - элемент комплексных моделей нефтегазовых систем. Современная концепция такого подхода впервые последовательно сформулирована членом-корреспондентом Н.Б. Вассоевичем, который назвал его историко-геологическим. В основе подхода лежат представления о стадийности и зональности процессов нефтегазообразования, разработанные С.Г. Неручевым, ак. А.Э. Конторовичем и др. Историко-геологические модели широко применяются для реконструкции истории нафтидогенеза в бассейнах Сибири [7], прогноза перспектив нефтегазоносности, в том числе нетрадиционных ресурсов высокоуглеродистых формаций (баженовская свита и др.) [8].

Все перечисленные направления работ возникали на базе вопросов, которые ставила геологоразведочная практика и которые не могли быть решены без построения соответствующей количественных теорий. Их логическим продолжением является создание комплексных цифровых моделей нефтегазоносных бассейнов Сибири, как основы развития теории нефтегазовой геологии и методики количественной оценки перспектив нефтегазоносности.

1. *Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Гуревич Г.С. и др.* Количественная оценка перспектив нефтегазоносности слабоизученных регионов. М.: Недра, 1988, 223 с.

2. *Бурштейн Л.М., Конторович А.Э., Лившиц В.Р., и др.* Вероятностная оценка перспективных ресурсов гелия центральных и южных районов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика, № 3, 2020, с. 400–408.

3. *Конторович А.Э., Лившиц В.Р., Бурштейн Л.М., Курчиков А.Р.* Оценка начальных и прогнозных (перспективных и прогнозируемых) геологических и извлекаемых ресурсов нефти Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции и их структуры // Геология и геофизика, № 5, 2021, С. 711–726.

4. *Бурштейн Л.М.* Возможный механизм формирования распределения скоплений углеводородов по крупности. // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (7), с. 815–825.

5. *Бурштейн Л.М.* Статистические оценки параметров распределения скоплений нефти по величине в слабоизученных седиментационных бассейнах // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (9), с. 1013–1023.

6. *Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р.* Теория нафтидогенеза: количественная модель эволюции аквагенного органического вещества в катагенезе // Геология и геофизика. 2021. 62. № 8. С.1026–1047.

7. *Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Малышев Н.А. и др.* Историко-геологическое моделирование процессов нафтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне

Карского моря (бассейновое моделирование) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1179–1226.

8. *Бурштейн Л.М., Конторович А.Э., Рыжкова С.В. и др.* К методике количественной оценки ресурсов углеводородов баженовской свиты юго-восточных районов Западно-Сибирского бассейна // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2021. 16. № 3. С.1–22.

# СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЕВРАЗИЙСКОГО КОНТИНЕНТА: ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИКА И КОРРЕЛЯЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*М.М. Буслов*

ФГБУН «Институт геологии и минералогии СО РАН», *г. Новосибирск*
buslov@igm.nsc.ru

Складчатые сооружения Центральной Азии, расположенные в центре Евразийского континента между Восточно-Европейским, Сибирским, Таримским и Северо-Китайским кратонами, традиционно охарактеризованы как аккреционно-коллизионные структуры, сформированные из фрагментов коры единого Палеоазиатского океана, островных дуг и микроконтинентов [1–5].

В новом тектоническом районирование Евразии нами использованы представления о главной асимметрия в структуре Земли, выраженная в формирование Тихоокеанского и Индо-Атлантического сегментов [6]. Тихоокеанский сегмент характеризуется длительной и сложной тектоно-магматической эволюции огромной океанской плиты и сложным субдукционно-аккреционных процессов наращивания ювенильной коры окружающих континентов. Формируются аккреционные орогены, содержащие фрагменты океанической коры (офиолиты и палеосимаунты) и примитивных островных дуг. Индо-Атлантическому сегменту свойственны процессы образования и распада суперконтинентов, а также неоднократное образование и закрытие океанов. Формируются коллизионные орогены, в которых совместно с фрагментами океанической коры участвуют различные по размерам блоки докембрийской континентальной коры.

На основе геологических, палеомагнитных, геохимических, петрологических и геохронологических данных показано [1–8], что главная тектоническая асимметрия Земли зародилась в позднем докембрии и представлена в структуре Центрально-Азиатского складчатого пояса, соответственно, аккреционным и коллизионным типами орогенов. Коллизионный ороген сформирован в позднем неопротерозое -кембрии в результате субдукции под юго-восточную окраину Сибирского континента (в современных координатах), Тувино-Монгольскую и Казахстанскую (Кипчакскую) островные дуги, литосферы Палеоазиатского океана, включающей докембрийские микроконтиненты и террейны Гондванской группы (Муйский, Тувино-Монгольский, Кокчетавский и др.). Коллизионный ороген наращивался активными окраинами, к которым аккретировали континентальные докембрийские блоки Гондваны, в том числе Таримский в позднем палеозое, Северо-Китайский в мезозое и Индийский в кайнозое. Аккреционный ороген состоит из позднепротерозойско –палеозойских островных дуг западной части Алтае-Саянской складчатой области, Северного и Восточного Казахстана, северо-западного Китая. В аккреционных клиньях аккреционного орогена представлены только фрагменты океанической коры, что указывает на их формирование на конвергентной границе Тихоокеанского типа. Массовое датирование цирконов показало, что возрастной интервал 1.4-0.85 млн лет (гренвильская орогения, характерная для Гондванского суперконтинента) широко представлен в коллизионном орогене и полностью отсутствует в аккреционном орогене.

Формирование структуры и напряженно-деформационное состояние земной коры Центральной Азии связано с результатом передачи деформаций от Индо-Евразийской коллизии на дальние расстояния по «принципу домино» через жесткие структуры докембрийских докембрийских блоков, расположенных среди фанерозойских складчатых поясов [9]. В результате коллизионного воздействия Индийского континента

неоднородная литосфера Центральной Азии была подвержена складкообразованию, формированием разломных структур и обширного горного пояса.

В мезозое Евразийский континент претерпел интенсивную тектоническую реактивацию, связанную с закрытием Монголо-Охотского океанического бассейна и последующей коллизией Северо-Китайского континента с Сибирского кратона и Центрально-Азиатским складчатым поясом. В результате был сформирован мезозойский Монголо-Охотский коллизионный ороген, особенности формирования которого, размеры, влияние на окружающую среду, в том числе на осадконакопление сопоставимы с кайнозойским Центрально-Азиатским орогеном. Проведенные методом трекового датирования апатита многочисленные исследования [19 и мн. др.] различных регионов Центрально-Азиатского складчатого пояса свидетельствуют о крупных мезозойских поднятиях рельефа в поздней юре-мелу (~150–80 млн. лет). Восточное звено орогена (Прибайкалье, Забайкалье, Восточная Монголия и Северо-Восточный Китай), расположенное в зоне фронтального столкновения, претерпело преимущественно складчато-надвиговые деформации с формированием высоких гор, сопоставимых с Гималаями. В западном звене, на обширной территории Северо-Западного Китая, Монголии, Алтае-Саянской области, Казахстана была образована внутриконтинентальная среднегорная система. Денудация Монголо-Охотского мезозойского орогена, особенно его восточного звена, привела к образованию обломочного материала, который речными системами выносился через транзитные зоны (современные Кузнецкий, Канско-Ачинский, Иркутский и Тувинский прогибы) в шельфовую область Азии в том числе крупнейший в мире Западно- Сибирский нефтегазоносный бассейн. U-Pb датирование детритовых цирконов указанных бассейнов хорошо коррелируется с возрастами магматических пород, слагающих огромные по размерам гранитойдные массивы Забайкалья и Монголии (Байкало-Витимский, Хангайский и Хэнтэйский).

1. *Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М.* Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Т. 1.325 С.; Т.2.334 С.

2. *Sengor A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S.* Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. // Nature. 1993. V. 364. P. 299–307.

3. *Диденко А.Н.,Моссаковский А.А.,Печерский Д.М. и др.* Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии // Геология и геофизика. 1994,Т. 35. № 78. С. 59–75.

4. *Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vernikovsky V.A.* Neoproterosoic to Early Ordovocian evolution of the Paleo–Asian Ocean: implications to the breakup of Rodinia // Gondwana Res. 2003.V. 6. N 2.P. 143–159.

5. *Моссаковский А.А., Пущаровский Ю.М., Руженцев С.В.* Крупнейшая структурная асимметрия Земли // Геотектоника. 1998. № 5. С. 3–18.

6. *Добрецов Н.Л., Буслов М.М.* Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии.// Геология и геофизика. 2007.Т.48. №1. С.93–108.

7. *Буслов М.М.* Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов// Геология и геофизика. 2011.Т.52. № 1. С.66–90.

8. *Dobretsov, N.L., Buslov, M.M., Delvaux, D. et al.* Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plume // International Geology Review. 1996. V. 38. P. 430–466.

9. *De Grave J., Buslov M.M., Van den haute P. et al.* From Palaeozoic Eurasian assembly to ongoing Indian indentation: multi-chronometry of the northern Kyrgyz Tien Shan batholith. Journal of Asian Earth Sciences. 2006. V.26 (2).P.133.

# АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКИХ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ СЕВЕРА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

*Е.В. Деев*

ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А.Трофимука СО РАН», *г. Новосибирск*

ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» *г. Новосибирск,*
DeeEV@ipgg.sbras.ru

В докладе рассмотрены актуальные направления исследований региональной геологии и нефтегазоносности мезозойско-кайнозойских осадочных бассейнов севера Центральной Азии и Российской Арктики. В первую очередь, мезозойско-кайнозойские бассейны Сибири и Российской Арктики интересны своими ресурсами углеводородов, которые обеспечиваю энергетическую безопасность Российской Федерации. К настоящему моменту для них накоплен огромный объем разноплановой геологической и геофизической информации. Этот объем требует планомерного комплексного осмысления. В этом направлении нами выполнены региональные обобщения по тектонике, палеогеографии, сейсмостратиграфии, нефтяной геологии и состоянию ресурсной базы углеводородов Енисей-Хатангского, Западно-Сибирского и Южно-Карского арктических осадочных бассейнов [1–3]. Особое внимание уделено анализу палеогеографии и перспектив нефтегазоносности юрских отложений. Разработан комплект из 13 литолого-палеогеографических карт масштаба 1 : 2 000 000 для региональных стратиграфических горизонтов юры бассейнов Российской Арктики [4]. На базе новых моделей строения выполнена количественная оценка перспектив нефтегазоносности юрских резервуаров Енисей-Хатангского и северо-востока Западно-Сибирского бассейнов. Начальные суммарные ресурсы углеводородов оценены в 12.5 млрд. т УУВ, из них газа – 11 млрд м$^3$ и конденсата – 1.6 млрд т [2].

Кайнозойские осадочные бассейны севера Центральной Азии – территории интенсивной хозяйственной деятельности человека. В то же время их активные разломные границы с горными хребтами являются генераторами сильной сейсмичности. Поэтому развитие здесь инфраструктуры предприятий горнодобывающего и топливно-энергетического комплексов, наряду с гражданской застройкой требуют адекватных оценок параметров их сейсмического режима и сейсмической опасности. Нами созданы сейсмотектонические модели, исследованы особенности палеосейсмичности и выполнены оценки сейсмической опасности в районах прокладки газопровода «Сила Сибири-2» в Горном Алтае. Установлено, что за последние 16 тыс. лет только вдоль северных окраин Чуйской и Курайской впадины произошло 11 палеоземлетрясений с магнитудами 6.6–7.6 и интенсивностями VIII–XI баллов; минимальным интервал повторяемости между ними составил 500 лет [5–7]. Аналогичные работы по районам строительства газопровода «Ташкент-Бишкек-Алматы» и хранилищ радиоактивных отходов в Кыргызстане позволили выявить активные разломы, которые сгенерировали не менее 20 голоценовых землетрясений с магнитудами Mw = 6.1–7.6 [8–9]. В ходе палеосейсмологических исследований разработан новый способ определения возрастов палеоземлетрясений с использованием абсолютных возрастов карбонатных отложений – травертинов, которые

выполняют роль индикаторов сейсмогенных подвижек. Доказана прямая корреляция возрастов сильных палеоземлетрясений и эпизодов травертинообразования в Горном Алтае за последние 9.5 тыс. лет. [10].

Самостоятельным направлением исследований является анализ геологической деятельности плейстоценовых ледников, покрывавших огромные территории Арктики, Сибири и севера Центральной Азии. Остро дискуссионным здесь является феномен гляциальных средне-позднеплейстоценовых мегапаводков, которые транспортировали огромное количество терригенного материала с гор юга Сибири в прилегающие крупные осадочные бассейны, например, Западно-Сибирский. Источником вод таких потоков были кайнозойские внутригорные впадины, блокированные ледниками. При прорывах ледниковых дамб в горах Алтая в движение приходили массы воды объемом до 1 тыс. км$^3$. За один непродолжительный мегапаводок на огромных площадях формировались специфические отложения мощностью до 100 м. Датирование этих отложений и перекрывающих их толщ методами оптически стимулированной и инфракрасно стимулированной люминесценции впервые показало, что основные Алтайские паводковые события, которые являются одним из мировых эталонов таких гидросферных катастроф, произошли древнее 80–90 тыс. лет [5, 11].

Палеосейсмологические исследования в Горном Алтае выполнены при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда 21-17-00058.

1. *Deev E.V., Shemin G.G., Vernikovsky V.A. et al.* Northern West Siberian-South Kara Composite Tectono-Sedimentary Element, Siberian Arctic. In Sedimentary Successions of the Arctic Region and their Hydrocarbon Prospectivity // Geological Society, London, Memoirs, 2022. V. 57. M57-2021-15.

2. *Deev E.V., Shemin G.G., Vernikovsky V.A. et al.* The Yenisei-Khatanga Composite Tectono-Sedimentary Element, Northern Siberia. Sedimentary Successions of the Arctic Region and their Hydrocarbon Prospectivity // Geological Society, London, Memoirs, 2021. V. 57. M57-2021-15.

3. *Vernikovsky V., Shemin G., Deev E. et al.* Geodynamics and oil and gas potential of the Yenisei-Khatanga basin (Polar Siberia) // Minerals, 2018. V. 8. P. 510.

4. *Shemin G., Deev E., Vernikovsky V.A. et al.* Jurassic paleogeography and sedimentation in the northern West Siberia and South Kara Sea, Russian Arctic and Subarctic // Marine and Petroleum Geology, 2019. V. 104. P. 286–312.

5. *Deev E., Turova I., Borodovskiy A. et al.* Large earthquakes in the Katun Fault Zone (Gorny Altai): paleoseismological and archaeoseismological evidence // Quaternary Science Reviews, 2019. V. 203. P. 68–89.

6. *Deev E.V., Turova I.V., Borodovskiy A.P. et al.* Unknown large ancient earthquakes along the Kurai Fault Zone (Gorny Altai): new results of paleoseismological and archaeoseismological studies // International Geology Review, 2017. V. 59. P. 293–310.

7. *Turova I., Deev E., Pozdnyakova N. et al.* Surface-rupturing paleoearthquakes in the Kurai Fault Zone (Gorny Altai, Russia): Trenching and geophysical evidence // Journal of Asian Earth Sciences, 2020. V.197. P. 104399.

8. *Deev E., Korzhenkov A., Turova I. et al.* Large ancient earthquakes in the western Issyk-Kul basin (Kyrgyzstan, northern Tien Shan) // Journal of Asian Earth Sciences, 2018. V. 166. P. 48–65.

9. Korzhenkov A.M., Deev E.V. Underestimated seismic hazard in the south of the Issyk-Kul Lake region (Northern Tien Shan) // Geodesy and Geodynamics, 2017. V. 8. P. 169–180.

10. *Деев Е.В., Дублянский Ю.В., Позднякова Н.И. и др.* Первые результаты $^{230}$Th/U-датирования сейсмогенных травертинов Горного Алтая // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле, 2021. Т. 500, № 2. С. 135–141.

11. *Зольников И.Д., Деев Е.В., Котлер С.А. и др.* Новые результаты OSL-датирования четвертичных отложений долины Верхней Катуни (Горный Алтай) и прилегающей территории // Геология и геофизика, 2016. Т. 57, 6. С. 1194–1197.

# ГЕОФИЗИКА И ФИЗИКА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА (ТЕОРИЯ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ)

*И.Н. Ельцов*

ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН», *г. Новосибирск*
yeltsovin@ipgg.sbras.ru

Геофизические исследования в скважинах (ГИС) фиксируют результат формирования зоны проникновения вследствие гидродинамического и геомеханического воздействия бурового инструмента и бурового раствора на околоскважинную зону. Понимание процессов, предшествующих геофизическим измерениям, и учет гидродинамической и геомеханической обстановки вблизи скважины позволяют более качественно проводить интерпретацию ГИС и достоверно определять фильтрационно-ёмкостные параметры нефтяного (ФЕС) пласта. Такой подход уже сегодня может войти в практику работ нефтяных и геофизических компаний, поскольку нами накоплен опыт интегрированного анализа комплекса геофизических, гидродинамических и геомеханических процессов при бурении и других работах на скважине. Создан инструментарий, опробованный в РФ и США, имеются предпосылки для закрепления приоритета России в геофизическом сервисе.

Сегодня в России и за рубежом активно развиваются совместные флюидо-геомеханические модели. Список публикаций российских и зарубежных учёных по теме работы приведён в [1]. Здесь ограничимся упоминанием авторов. Совместным моделям посвящены, например, работы (Settari and Mourits, 1998; Chin et al., 2000; Thomas et al., 2003; Tran et al., 2005; Settari, Sen, 2008; Lautenschläger et al., 2013; Jalali, Dusseault, 2012; Ельцов и др., 2012, 2014). Особенно активно междисциплинарные исследования в этом направлении развиваются в последнее время, что предопределено достигнутыми возможностями математического и численного моделирования, а также востребованностью в прикладных задачах геологоразведки и добычи углеводородов.

В зависимости от гидрофизических, электрофизических и геомеханических свойств пластов, режимов бурения при первичном вскрытии пласта могут существенно или, напротив, пренебрежимо мало изменяться фильтрационно-ёмкостные свойства изменённой зоны пласта, а определяемые ФЕС ложатся в основу промысловой стратегии и схемы разработки месторождений. Характеристики процесса фильтрации бурового раствора в пласт при бурении, определяемые геомеханическим и гидродинамическим воздействием на прискважинную зону, могут существенно влиять на показания каротажных приборов, что должно учитываться при интерпретации материалов геофизических исследований в скважинах.

Автором в течение более 20 лет развит инновационный подход к интерпретации данных ГИС, основанный на построении совместных моделей нефтенасыщенного коллектора, согласующих в себе описание основных взаимосвязанных и взаимообусловленных физических процессов в окрестности скважины и основных параметров, контролирующих эти процессы. Только при учёте всех существенных факторов, определяющих формирование зоны проникновения при бурении, можно простроить эффективную стратегию интерпретации каротажных данных и достоверно оценить фильтрационно-ёмкостные параметры пласта. В противном случае неучтённые особенности прискважинной зоны перенесутся при инверсии на свойства пласта

и приведут к ошибочным прогнозам промысловых характеристик. Совместная электрофизическая и геомеханическая модель прискважинной зоны предполагает рассмотрение геомеханических процессов при бурении скважины, изменения фильтрационно-ёмкостных свойств пород, процессов фильтрации, солепереноса, роста и разрушения глинистой корки, изменения электрофизических характеристик пород с расчётом показаний зондов электрического и электромагнитного каротажа для реалистичных моделей сред. Теоретико-методическая основа данной работы представлена в (Yeltsov I. et al., 2015).

При модельном подходе важно выбрать адекватную задаче параметризацию среды, чтобы учесть все основные модельные параметры, значимо влияющие на моделируемые процессы. Созданная автором единая электрогидродинамическая и геомеханическая модель нефтенасыщенных коллекторов описывается параметрами пласта, бурового раствора и режима бурения, а также меняющимися со временем полями напряжений, водонасыщенности, солёности, удельного электрического сопротивления. От последнего зависит поведение синтетических диаграмм каротажных зондов. Для построения моделей автор использует разработанный под его руководством программный комплекс моделирования процессов фильтрации двухфазной жидкости в пласт и солепереноса в условиях напряжённо-деформированного состояния в результате бурения скважины (Ельцов и др., 2012; Свидетельство о гос. регистрации…, 2012; Назарова и др., 2013; Ельцов и др., 2014; Нестерова и др., 2014), компьютерные модели электропроводности гетерогенных сред (Нестерова, 2008; Глинских и др., 2014) и программы расчёта показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ для трёхмерных сред (Суродина, Нестерова, 2015), а также данные лабораторных петрофизических и геомеханических измерений, составляющих базу данных PetroMechBD (Свидетельство о гос. регистрации …, 2015), созданную под руководством автора. В базу данных входят не только числовые параметры, но и измеренные зависимости проницаемости от напряжения, которые определяют новые значения фильтрационно-ёмкостных параметров вблизи скважины в результате эволюции зоны проникновения.

Таким образом, применительно к задачам исследований в нефтегазовых скважинах автором создана теория, разработан программно-методический комплекс для интегрированного анализа геофизических, технологических и других измерений. На материалах компаний Лукойл, Сургутнефтегаз, Роснефть, Татнефть, Baker Hughes, Statoil показана эффективность разработанного инструментария. Проведены натурные эксперименты на Когалымском месторождении (ХМАО, РФ) и на полигоне компании Baker Hughes (Оклахома, США). Создан АТЛАС цифровых двойников, содержащий расчёты для типичных условий бурения скважин, различных геомеханических и гидродинамических условий первичного вскрытия продуктивных пластов. В практику работ нефтяных и сервисных компаний внедряется многофизичная модель процессов, протекающих в окрестности скважины, позволяющая использовать расширенный комплекс скважинных измерений для повышения достоверности оценки параметров продуктивных пластов и разыгрывания сценариев оптимального вскрытия залежей.

1. *Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Соболев А.Ю., Суродина И.В.* Многофизичные модели коллекторов: построение базы данных АТЛАС МФМ [Электронный ресурс] // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (г. Геленджик, 9-13 сентября 2019 г.) : Тезисы докладов. 2019. С. 1–5.

# РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И СЕВЕРНОЙ МОНГОЛИИ В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ НА ОСНОВЕ БИО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ЛЕТОПИСЕЙ ИЗ ОЗЕРНЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

*А.П. Федотов*

ФГБУН «Лимнологический институт СО РАН», *г. Иркутск*
mix@lin.irk.ru

За последние десятилетия, благодаря изучению океанических, морских и ледниковых кернов, достигнут значительный прогресс в понимание причинно-следственных факторов управляющими крупнопериодическими (400, 100, 41, 21 тыс. лет) изменениями климатического облика Земли. Когда, уже достоверно известна, климатическая летопись Земли, по крайней мере, последних 700 тыс. лет, с временным шагом в несколько тысячелетий. Однако, во многом актуальными остаются вопросы, связанные с короткопериодными осцилляциями геологической среды на континентальных территориях значительно удаленных от Мирового океана.

На основе изучения химического состава и морфологии гранатов из донных отложений Байкала, выяснение взаимосвязи поступления кластогенного материала в донные осадки с палеоклиматическими изменениями, происходившими в Байкальском регионе за последние 250 тыс. лет, так в межледниковые периоды возрастала северо-восточная составляющая переноса материала [1].

По данным изучения структуры и вещественного состава осадочного чехла озера Хубсугул (Монголия) впервые выполнена реконструкция тектоно-климатической эволюции западной части Байкальской рифтовой зоны в позднем кайнозое. Определено, что 5.5–6 млн лет назад начался неотектонический цикл (рисунок). Периоды аридизации регионального палеоклимата соотносятся с оледенениями неоплейстоцена [2].

Сейсмоакустические исследования осадочного чехла оз. Орон (В. Сибирь), опровергли гипотезу существования ледниковой плотины, вызвавшей формирование гигантского ледниково-подпрудное озеро палео-Витим (3000 км$^3$) в последнее оледенение плейстоцена [3].

На основе разработанной система химических и биологических элементов индикаторов, маркирующих изменения ландшафтов и биопродуктивности озер, определено, что остатки позднеплейстоценовых ледников юга Восточной Сибири кардинально сократились в размерах или полностью исчезли в течении термального оптимума голоцена. Вероятнее всего, наблюдаемы сейчас ледники сформировались в Малый ледниковый период [4].

С временным разрешением год-сезон (РФА-СИ) выявлены параметры отклика многолетней мерзлоты п-овов Таймыр и Гыданский на климатические изменения за последние 170 лет. Установлено, что интенсификация процесса деградации многолетней мерзлоты следует за температурным максимумом с задержкой в 5–7 лет [5].

Элементный анализ донных отложений Байкала показал, что минимальный уровень (порядка 35 м ниже современного) был около 30–34 тыс. л. н., а не 15–20 тыс. л.н как считалось ранее. Первое увеличение водности притоков Байкала произошло с 23 до 25 тыс. л. н., второе – с 19,5 до 18 тыс. л.н [6].

В дополнение к существующим методам, описывающим обстановки озерного седиментогенеза, видится крайне актуальным использованием методов палео-ДНК. Так на основе этого подхода описаны эпизоды цветения цианобактерий на Байкале за последние 700 лет. Согласно метагеномике, современный комплекс байкальских видов токсичных цианобактерий начал формироваться около 1920 г.


1. *Скляров Е.В., Федотов А.П., Вологина Е.Г., и др.* Гранаты из донных отложений Академического хребта (оз. Байкал) – индикаторы механизмов переноса и источников сноса кластогенного материала // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 9. С. 1342–1353.

2. *Fedotov A., Kazansky A.Y., Tomurhuu D., et al.* 1-Myr Record of Paleoclimates from lake Khubsugul, Mongolia // EOS. 2004. Vol. 40. № 5. P. 387, 390.

3. *Fedotov A.P., Chensky D.A., Grigorev K.A., et al.* Reconstruction of the Late-glacial and Holocene history of Lake Oron (Eastern Siberia, Russia) based on high-resolution reflection seismic data // Environment. Earth Science. 2015. Vol. 74. № 3. P. 2083–2091. DOI: 10.1007/s12665-015-4642-x.

4. *Stepanova O.G., Trunova V.A., Osipov E.Yu., et al.* Glacier dynamics in the southern part of East Siberia (Russia) from the final part of the LGM to the present based on from biogeochemical proxies from bottom sediments of proglacial lakes // Quaternary International. 2019. Vol. 524. P. 4–12. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.03.003.

5. *Fedotov A.P., Phedorin M.A., Enushchenko I.V., et al.* A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia) // Global and Planetary Change. – 2012. – № 98–99. – P. 130–152.

6. *Fedotov A.P, Trunova V.A., Stepanova O.G., et al.* Changes in mineral and chemical elements patterns of bottom sediments of Lake Baikal (Russia) as high resolution records of moisture for the past 16–31 ka BP // Quaternary International. 2021. DOI 10.1016/j.quaint.2021.05.026.

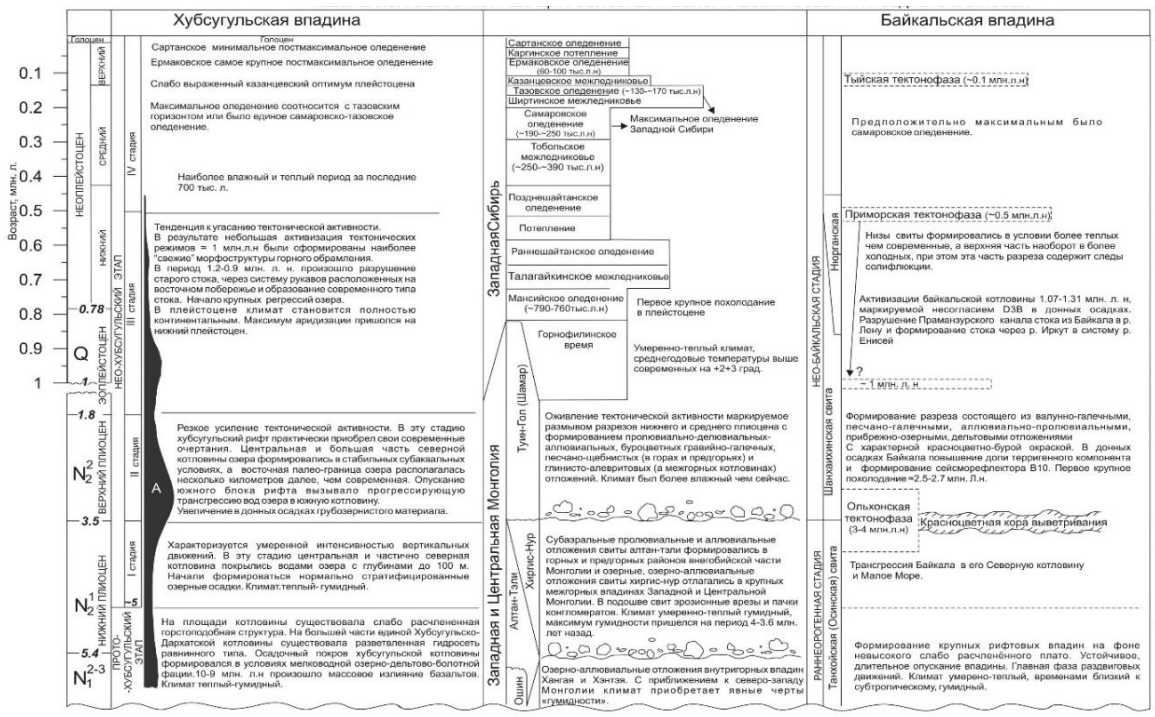




Рисунок. Межрегиональная корреляция основных геологических событий позднего кайнозоя Сибири

# «СТРАТИГРАФИЯ, ПАЛЕОНТОЛОГИЯ; МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ; ГЕОХИМИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД; ГЕОФИЗИКА, СЕЙСМОЛОГИЯ»

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ПЛЕЙСТОЦЕНА ЯКУТИИ

*Г.Г. Боескоров*

ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН», *г. Якутск*
gboeskorov@mail.ru

Исследования остатков некоторых млекопитающих олерской фауны (эоплейстоцен – ранний неоплейстоцен) позволили уточнить их систематический статус, распространение и стратиграфическое значение. Описаны находки малого пещерного медведя *Ursus (Spelearctos) savini* с территории Якутии, свидетельствующие об очень широком распространении в конце раннего – начале среднего неоплейстоцена этого хищника, освоившего разнообразные ландшафтные зоны от Средиземноморья до Сибирской Арктики [1, 2]. Описана самая северная в Якутии находка носорога Мерка *Stephanorhinus kirchbergensis*, характерного для среднего неоплейстоцена и уточнено распространение вида на данной территории [3]. Линия широколобых лосей рода *Cervalces* в Якутии прослеживается с эоплейстоцена и раннего неоплейстоцена. Для этого времени отмечен длинноштанговый *C. latifrons*. Поздней форме длинноштангового лося из среднего неоплейстоцена придан статус самостоятельного вида – *C. postremus* и показано, что эволюционная линия настоящих лосей *Alces* не связана с данным видом и, по-видимому, существовала параллельно с линией Cervalces с конца плиоцена – начала плейстоцена. Лоси рода *Cervalces* не являются предками *Alces*. Формирование современных *Alces* происходило в конце среднего – начале позднего неоплейстоцена, возможно, на территории Восточной Сибири. В позднем неоплейстоцене произошла дивергенция рода *Alces* на *A. americanus* и *A. alces* [4–7]. На территории Якутии уточнен ареал зоргелии *Soergelia* sp., парнокопытного, характерного для первой половины плейстоцена и ее таксономическая принадлежность – она относится к крупной форме, возможно, конспецифичной *S. elisabethae* [8].

Исследованы остатки млекопитающих мамонтовой фауны (поздний плейстоцен), в том числе и их замороженные мумии. Проведены комплексные исследования и описания остатков трупа Юкагирского мамонта [9], мамонта Юка [10], Оймяконского детеныша мамонта [11]; Колымского носорога [12]; Юкагирских бизона и лошади [10, 13, 14], среды их обитания и других мумий из вечной мерзлоты. Установлено, что шерстистый мамонт *Mammuthus primigenius* обладал комплексом специфических анатомо-морфологических (густая длинная трехъярусная шерсть, маленькие уши, короткий хвост, жировой «горб», «капюшонное» расширение на хоботе, широкие подошвы ног) [9–11, 15] и физиологических (пониженная чувствительность к холоду, своеобразный липидный обмен) адаптаций к криоаридным условиям ледникового периода. Кроме того, головной мозг мамонта имел большие мозжечок и обонятельные луковицы [16], что, очевидно, свидетельствует о значительных двигательных способностях и хорошем обонянии. Эти адаптации обеспечивали существование и широкое распространение мамонта в Северной Голарктике длительное время.

Впервые сформулировано представление о севере Восточной Сибири, как о рефугиуме мамонтовой фауны в голоцене [17]. Описаны новые подвиды пещерного льва *Panthera spelaea vereshchagini* [18], ископаемых благородного оленя *Cervus elaphus cherskii* [19] и снежного барана *Ovis nivicola vorontsovi* [20]. Изучены и уточнены ассоциации хищных млекопитающих Якутии позднего квартера [21].


1. *Sher A.V., Weinstock J., Baryshnikov G.F., Davydov S.P., Boeskorov G.G. et al.* The first record of “speloid” bears in Arctic Siberia // Quaternary Science reviews, 2011. Vol. 30. №№ 17–18. P. 2238–2249.

2. *Боескоров Г.Г., Григорьев С.Е., Барышников Г.Ф.* Новое доказательство существования пещерных медведей в плейстоцене Сибирской Арктики // Доклады Академии наук, 2012. Т. 445. № 2. С. 226–230.

3. *Шпанский А.В., Боескоров Г.Г.* Самая северная находка носорога Мерка Stephanorhinus kirchbergensis (Jäger) и таксономический статус Coelodonta jacuticus Russanov (Mammalia, Rhinocerotidae) // Палеонт. журнал, 2018. № 4. С. 92–110.

4. *Боескоров Г.Г.* Систематика и происхождение современных лосей. Новосибирск: Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 2001. 119 с.

5. *Боескоров Г.Г.* Систематическое положение “Alces latifrons postremus” и взаимоотношения между родами Cervalces и Alces // Палеонт. журн. 2002. № 6. С. 88–95.

6. *Boeskorov G.G.* A review of the systematics of Pliocene and Pleistocene moose, part 2 // Cranium (Netherlands), 2006, № 1. P. 3–16.

7. *Nikolskiy P., Boeskorov G.* Primitive and derived features in the teeth of modern moose (Alces, Cervidae) from Eastern Siberia // Rus. J. of Ther., 2011. V. 10. № 1. P. 27–30.

8. *Боескоров Г.Г.* К распространению и таксономии ископаемой зоргелии (Soergelia sp.) на территории Якутии // Зоол. журн., 2019. Т. 98. № 10. С. 1148–1155.

9. *Агенброд Л., Аргунов В.А., Боескоров Г.Г. и др.* Юкагирский мамонт. СПб: изд-во С.-Петербургского университета, 2007. 252 с.

10. *Boeskorov G.G., Potapova O.R., Mashchenko E.N. et al.* Preliminary analyses of the frozen mummies of mammoth, bison (Bison priscus) and horse (Equus sp.) from the Yana-Indigirka Lowland, Yakutia, Russia // Integrative Zoology, 2014. V.9. № 4.P. 471–480.

11. *Боескоров Г.Г., Тихонов А.Н., Лазарев П.А.* Новая находка детеныша мамонта // Доклады РАН, серия биологическая, 2007. Т.412. № 6. С. 840–843.

12. *Boeskorov G.G., Lazarev P.A., Sher A.V. et al.* Woolly rhino discovery in the lower Kolyma River // Quaternary Science reviews, 2011. Vol. 30. №№ 17–18. P. 2262–2272.

13. *Boeskorov G.G., Potapova O.R., Protopopov A.V. et al.* The Yukagir Bison: analysis of a complete frozen mummy of the bison, Bison priscus from the early Holocene of Northern Eurasia // Quaternary International, 2016. V. 406. P. 94–110.

14. *Boeskorov G.G., Potapova O.R., Protopopov A.V. et al.* A study of a frozen mummy of a wild horse from the Holocene of Yakutia, East Siberia, Russia // Mammal Research, 2018. Vol. 63. № 3. P. 307–314.

15. *Boeskorov G.G., Maschenko E.N., Plotnikov V.V. et al.* Adaptation of the woolly mammoth Mammuthus primigenius (Blumenbach, 1799) to habitat conditions in the glacial period // Contemporary problems of Ecology, 2016. Vol. 9. № 5. P. 544–553.

16. *Kharlamova A., Saveliev S., Kurtova A., Chernikov V., Protopopov A., Boeskorov A. et al.* Preserved brain of the Woolly mammoth (Mammuthus primigenius (Blumenbach 1799)) from the Yakutian permafrost // Quaternary International, 2016. V. 406. P. 86–93.

17. *Boeskorov G.G.* Arctic Siberia: Refuge of the Mammoth Fauna in the Holocene // Quaternary International. 2006. V. 142–143. P.119–123.

18. *Baryshnikov G. and Boeskorov G.* The pleistocene cave lion, Panthera spelaea (Carnivora, Felidae) from Yakutia, Russia // Cranium, 2001. V. 18, N 1. P. 7–24.

19. *Боескоров Г.Г.* Систематическое положение благородного оленя *Cervus elaphus* L. (Cervidae, Artiodactyla, Mammalia) из неоплейстоцена Северо-Восточной Азии // Палеонтол. журн. 2005. № 3. С. 1–13.

20. *Боескоров Г.Г.* Новый подвид ископаемого снежного барана (Artiodactyla, Bovidae, Ovis) из Якутии // Зоол. журн., 2014. Т. 93. № 7. С. 868–876.

21. *Боескоров Г.Г., Барышников Г.Ф.* Позднечетвертичные хищные млекопитающие Якутии. СПб.: Наука, 2013. 199 с.

# СТРАТИГРАФИЯ И ПАЛЕОНТОЛОГИЯ ВЕРХНЕГО ПРОТЕРОЗОЯ: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Д.В. Гражданкин*

ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН», *г. Новосибирск*
grazhdankindv@ipgg.sbras.ru

Перспектива выделения в докембрии стратонов, которые отражали бы эволюционные изменения и этапность развития органического мира, представляется чрезвычайно привлекательной и актуальной; однако, каких-либо устойчивых закономерностей в появлении и распространении таксонов до недавнего времени так и не удалось выявить. Эта проблема имеет решение, если к интерпретации палеонтологических данных подходить на комплексной, междисциплинарной основе с учетом современных концепций теоретической экологии и филогенетики, основываясь на результатах актуопалеонтологических исследований и тафономических экспериментов. Получившееся филогенетическое древо эукариот служит основой для построения глобальной хроностратиграфической шкалы докембрия и пограничных кембрийских отложений. Впервые установлено время появления и получена наиболее достоверная реконструкция древнейших представителей архепластид, опистоконт, гетероконт, экскават, эуметазой; установлено время появления первого и последнего общего предка билатерий. Показано, что вендская мягкотелая макробиота авалонского типа обитала в бескислородных условиях; судя по всему, экологическая дифференциация сообществ эдиакарских мягкотелых могла быть обусловлена окислительно-восстановительными условий в обстановках обитания. Опровергнуто массовое вымирание акантоморфных акритарх 600 млн лет назад и мягкотелых макроорганизмов в конце венда, что указывает на стабильность состояния экосистем на протяжении всего вендского периода (600–529 млн лет). Показано, что появление биоминерализации может быть вовсе не связано с давлением со стороны хищников или необходимостью передачи опорной функции; появление скелетов изначально является следствием ощелачивания океана и необходимостью древнейших организмов регулировать содержание кальция в клетках. Показано соответствие нижней границы томмотского региояруса основанию условного второго яруса кембрия Стандартной глобальной хроностратиграфической шкалы. Доказана синхронность появления фитопланктона и зоопланктона, бентосных и пелагических хищников, крупных скелетных организмов, увеличения глубины и интенсивности переработки осадка роющими организмами в начале томмотского века кембрийского периода 529 млн лет назад. Все вышеперечисленные события имели глобальное океанографическое значение, о чем свидетельствует одновременное с этими событиями резкое обогащение или обеднение морской воды и карбонатного осадка легким изотопом углерода. Каждый из намечающихся стратонов протерозоя отражает перестройку всей совокупной палеоэкосистемы во времени, а не в пространстве. Природная системность таких стратонов и заключенных в них палеоэкосистем обеспечивает выполнение общестратиграфического принципа хронологической взаимозаменяемости признаков («принципа трансмиссии корреляционной функции») при ближне- и дальнемагистральной корреляции.

Исследования ведутся при финансовой поддержке РНФ, грнат 20-67-46028.

# МЕЗОЗОЙСКИЕ АРКТИЧЕСКИЕ И БОРЕАЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ: МИКРОБИОТА, СТРАТИГРАФИЯ, БИОФАЦИИ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

*Б.Л. Никитенко*

ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А.Трофимука СО РАН», *г. Новосибирск*
NikitenkoBL@ipgg.sbras.ru

Геологическая изученность арктических территорий, Российского сектора шельфа Северного Ледовитого океана совершенно недостаточна, однако, ясно, что без освоения топливо-энергетических и минеральных ресурсов Арктики Россия в XXI веке не сможет успешно развиваться дальше. В связи с этим, геологические работы требуют опережающей разработки высокоразрешающих стратиграфических схем нового поколения. Арктический бассейн в мезозое располагался на территории, близкой к современному Северному Ледовитому океану и прилегающих эпиконтинентальных морей [1]. Достоверные стратиграфические, биофациальные, био- и географические построения невозможны без корректных и тщательно проработанных монографических исследований. Микрофауна является одним из наиболее эффективных инструментов для стратиграфических, биофациальных и палеогеографических реконструкций, особенно на геологически “закрытых” территориях. Арктическая микробиота, в сравнении с таковой из более южных бассейнов, ранее характеризовалась значительной таксономической обедненостью. В последние десятилетия нами изучались микрофоссилии из разных биогеографических провинций Арктического бассейна. При наличии представительных гомогенных выборок из ископаемых популяций определялись пределы изменчивости видов. На основании этого, с применением статистических методов, современных представлений о биологии групп был существенно пересмотрен объем изученных таксонов. Монографические исследования позволили в наиболее полном виде выявить таксономический состав мезозойских комплексов фораминифер и остракод. Установлено, что степень эндемизма сибирской микрофауны была не столь высока, как это представлялось ранее, что позволило определить маркирующие ассоциации для разномасштабных корреляций [1].

Совершенствование стратиграфических методов исследований, разработка высокоразрешающих стратиграфических схем мезозоя на комплексной основе (с учетом комплекса био-, эко-, лито-, хемо-, сиквенс- и сейсмостратиграфических данных) является одной из актуальнейших проблем. Поэтому проводились всесторонние исследования эталонных разрезов мезозоя разных регионов Арктики. В последние годы удалось провести широкомасштабные комплексные исследования разрезов мезозоя Лаптевоморского региона: прибрежных и внутренних районов, Арктических островов [2–6]. На основе стратиграфического и фациального анализа изученных эталонных разрезов мезозоя конструировались региональные высокоразрещающие стратиграфические схемы нового поколения, куда наряду с традиционными данными включались фациальные особенности литостратонов, хемостратиграфические сведения, качественно определены потенциально нефтепроизводящие породы и коллектора [6, 7]. В эволюции мезозойского бассейна восточной части моря Лаптевых выделены несколько глобальных седиментационных этапов. На каждый из них разработано фациальное районирование и впервые для этого региона разработаны стратиграфические схемы мезозоя [2–6]. Разрезы мезозоя Новосибирских островов являются ключевыми в понимании геологического строения шельфов морей Восточной Арктики. Предполагается, что базальный сейсмокомплекс осадочного чехла шельфа моря Лаптевых, трактуемый рядом исследователей как “апт-альбский” резко

несогласно залегает на литифицированных и дислоцированных породах “акустического фундамента”. На о-ве Котельный апт-альбские неконсолидированные толщи местами залегают с размывом на более древних слаболитифицированных комплексах триаса и юры, но конформно с ними. Крупный стратиграфический (временной) перерыв может быть обоснован только биостратиграфическими методами, т.е. доказано, что нижняя граница “среднемелового” комплекса не соответствует характеристике нижнего сейсмического горизонта моря Лаптевых [4, 5]. Анализ данных по составу юрской и меловой микрофауны разных регионов северного полушария показал, что там присутствуют те же таксоны и отмечаются такие же последовательности комплексов, что и на севере Сибири. Ревизия микропалеонтологических данных позволила существенно пересмотреть зональные шкалы и стратиграфию юры и мела Баренцевского региона, Северной Америки, проследить практически всю последовательность северосибирских зон по микрофауне и выявить ряд корреляционных реперных уровней с бореально-тетическими разрезами. Это позволяет рассматривать разработанные зональные шкалы по микрофауне в качестве Бореального зонального стандарта [1]. Хемостратиграфический анализ вариаций значений $\delta^{13}C$ имеет очень хорошие перспективы для глобальных корреляций, с учетом биостратиграфических данных [6, 7]. Таким образом, комплексом разных стратиграфических методов удалось увязать мезозой Арктики в единый каркас. Анализ биотических и абиотических событий, как и надежная стратиграфическая основа создает предпосылки для достоверной реконструкции истории развития Арктических бассейнов [1–7].

Распределение микрофауны в мезозойских Арктических морях определялось ее дифференциацией по биономическим зонам. Биофациальный анализ микрофоссилий и седиментологических данных позволил реконструировать эволюцию палеообстановок разных арктических и бореальных бассейнов. В течение мезозоя в Арктических бассейнах отмечается несколько уровней резкой смены состава микробентоса. Изучено состояние биот в пред-, пост- и кризисный этапы и их реакция на резкие изменения среды в разных бассейнах (от арктических до тетических). Выявлены закономерности изменений в синхронных сообществах разных биогеографических единиц при прохождении этих этапов [1, 3, 6]. Проведено биогеографическое районирование юрских и меловых бореальных бассейнов по микробентосу. Выделен ряд биогеографических единиц в ранге областей и провинций [1–5], что позволило обосновать палеогеографическое положение ряда террейнов в мезозое, позиция которых по разным палинспатическим реконструкциям была далеко не однозначна.

1. *Никитенко Б.Л.* Стратиграфия, палеобиогеография и биофация юры Сибири по микрофауне (фораминиферы и остракоды) // Параллель. Новосибирск. 2009. 680 с.

2. *Никитенко Б.Л., Шурыгин Б.Н., Князев В.Г. и др.* Стратиграфия юры и мела Анабарского района (Арктическая Сибирь, побережье моря Лаптевых) и бореальный зональный стандарт // Геол. и геофиз. 2013. Т. 54. № 8. С. 1047–1082.

3. *Никитенко Б.Л., Князев В.Г., Пещевицкая Е.Б., Глинских Л.А*. Верхняя юра побережья моря Лаптевых: межрегиональные корреляции и палеообстановки // Геол. И геофиз. 2015. Т. 56. № 8. С. 1496–1519.

4. *Никитенко Б.Л., Девятов В.П., Лебедева Н.К. и др.* Стратиграфия юры и мела архипелага Новосибирские острова (море Лаптевых и Восточно-Сибирское море) фациальное районирование и литостратиграфия // Геол. и геофиз. 2017. Т. 58. № 12. С. 1867–1885.

5. *Никитенко Б.Л., Девятов В.П., Константинов А.Г. и др*. Триас архипелага Новосибирские острова и его положение в структуре осадочного чехла Лаптевоморского шельфа // Геол. и геофиз. 2022, Т.62, № 4, DOI: 10.15372/GiG2021166.

6. *Nikitenko B.L., Pestchevitskaya E.B., Khafaeva S.N.* High-resolution stratigraphy and palaeoenvironments of the Volgian-Valanginian in the Olenek key section (Anabar-Lena region, Arctic East Siberia, Russia) // Rev. de Micropal. 2018. T. 61. № 3–4. C. 271–312.

7. *Suan G., Nikitenko B.L., Rogov M.A. and oth.* Polar record of Early Jurassic massive carbon injection // Earth and Planetary Science Letters. 2011. 312. V. 1–2. P. 102–113.

# СТРАТИГРАФИЯ ПАЛЕОЗОЙСКИХ БАССЕЙНОВ СИБИРИ – АКТУАЛЬНЫЕ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ, ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЕ, СОБЫТИЙНЫЕ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

*Н.В. Сенников*

ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН» *г. Новосибирск*
sennikovnv@ipgg.sbras.ru

За последние 20 лет развитие стратиграфии фанерозоя проходило на фоне новой парадигмы совершенствования структуры Международной стратиграфической шкалы – взамен стратотипа подразделения выбор лимитотипа его нижней границы ГСРТ (GSSP), при кардинальной перестройке объёмов и наименований ярусных подразделений. До сих пор находится в стадии формирования Международный ярусный стандарт кембрийской системы – не выбраны названия 2-го, 3-го и 10-го ярусов и второго отдела, изменились объёмы отделов, и их стало четыре вместо трех. Обновился Международный ярусный стандарт ордовикской и силурийской шкал. Вместо британских ордовикских ярусов (арениг, лланвирн, лландейло, карадок, ашгилл) в Международную шкалу введены фло, дапин, дарривил, сандбий, катий, хирнант. Изменились и объемы отделов (нижнего, среднего и верхнего). Лландоверийское, венлокское и лудловское силурийские британские подразделения, ранее использовавшиеся как ярусы, переведены в ранг отделов с делением их на рудданский, аэронский, теличский, шейнвудский, гомерский, горстийский и лудфордский ярусы. Для ордовика и силура автором настоящего сообщения научно доказана возможность и необходимость перехода в российской номенклатуре Общей стратиграфической шкалы от названий традиционных британских ярусов к применению новых наименований Международных ярусов. Для этого с зональной точностью определено стратиграфическое положение всех нижних границ новых ярусов ордовика и силура Международной шкалы в различных регионах России.

«Различия» между Общей и Международной шкалами O и S устранены. Однако две «хроностратиграфические линейки» – Общая стратиграфическая шкала России, базирующаяся на новых принципах МСШ, с одной стороны, и региональные шкалы O и S (в региональных схемах), с другой стороны, основываются на использовании разных исходных параметров. Первая (ОСШ) конструируется по лимитотипам GSSP (ГСРТ) как хроностратиграфическим меткам начала подразделения (без учета литологии), а вторая (последовательность горизонтов) – по стратотипам, то есть по стратиграфическому объему и литологии всего подразделения. Кроме того, в ОСШ хроностратиграфическое положение нижних границ ярусов определяется исключительно по первому появлению (FAD) зональных таксонов пелагических групп (граптолиты, конодонты, хитинозои, вертебраты), а в региональных шкалах при выделении горизонтов, как историко-геологических этапов развития палеобассейна и существовавших в нем биот, используются данные по наиболее распространенным бентосным группам (трилобитам, брахиоподам, остракодам, кораллам, мшанкам и др.).

Региональная схема крупнейшего в мире ордовикского бассейна Сибирской платформы охарактеризована горизонтами с высоким (за счет единства) потенциалом внутрирегиональной корреляции. Хронометрическое предназначение таких горизонтов относительно низкое. С другой стороны, региональные стратиграфические схемы неоднородных O-S бассейнов (Таймырская и Алтае-Саянская складчатые области) обладают высоким хронометрическим потенциалом сопоставления с границами ярусов

Международной стратиграфической шкалы. Такое точное сопоставление базируется на зональных последовательностях пелагических групп фауны. Нередко, в схемах инструментом для внутрирегиональной корреляции местных стратонов являются зональные последовательности по пелагическим группам, а выделяющиеся там горизонты по бентосным группам используются только при расчленениях местных стратонов, в которых отсутствуют пелагические группы. Точность внутрирегиональной корреляции местных стратонов по горизонтам значительно уступает детальности корреляции по зональным последовательностям пелагических групп.

Для палеозойских бассейнов России для целей био-, и особенно, зональной стратиграфии, первоочередное значение приобретает комплекс палеонтологических исследований ортостратиграфических пелагических групп. Автором настоящего сообщения получены следующие результаты. Выявлены переломные рубежи эволюции биосферы в палеозое – дивергенции (радиации) и вымирания: а) определены стратиграфические положения «зарождения» новых групп фауны (птеробранхий, граптолитов, радиолярий, хитинозой, вертебрат); б) время начала освоения пелагиали, включая переход от бентосного образа жизни к планктонному; в) стратиграфическое положение и причины глобальных вымираний. Например, установлено время «зарождения» типа Hemichordata – 500 млн лет и доказано появление древнейших радиолярий (первый зоопланктон) в раннем кембрии (ботомский век – 515 млн лет).

Обоснована возможность использования при определении возраста и межрегиональных корреляциях одноимённых видов-индексов граптолитовых зон в 10 опорных для O и 12 для S геологических регионах России. Выделены автономные и параллельные зональные шкалы по разным пелагическим группам – граптолитам, конодонтам, хитинозоям, радиоляриям, аммонитам, вертебратам для ордовика, силура и девона Европейской части России, Сибири и Арктических районов страны, а также Узбекистана и Таджикистана. Зональные шкалы являются прецизионным инструментом для определения возраста геологических событий с точностью 0,1–1,5 млн лет.

Дополнительными реперами для точных (0,1–0,5 млн. лет) межконтинентальных корреляций и для распознавания границ ярусов ОСШ служат событийные уровни (как седиментационные, так и биотические). Так, в O и S Алтая и Салаира установлены «следы» таких глобальных событий как: 1) тремадокское трансгрессивное Black Mountain; 2) тремадокское регрессивное Ceratopyge; 3) флоское трансгрессивное Billingen; 4) дарривильское регрессивное Stein; 5) сандбийское регрессивное Vollen; 6) хирнантское регрессивное Hirnant; 7) аэронское регрессивное Sandvika; 8) теличское трансгрессивное Ireviken; 9) гомерское трансгрессивно-регрессивное Mulde. Событие Хирнант, связанное с глобальным оледенением, зафиксировано как седиментационное и как событие изотопного углеродного сдвига (HICE). Оно стало триггером глобального позднеордовикского вымирания как для бентосных, так и для пелагических биот.

Установлено пять хроностратиграфических уровней рифообразования в ордовикско-силурийском интервале Алтайского бассейна и определено экваториально-тропическое палеогеографическое расположение самого бассейна. Осуществлена лито- и биофациальная оценка палеоглубин сибирских бассейнов, построены их фациальные профили и модели. Установлен континентальный генезис ордовикских отложений Центральной Тывы – речные, озерно-старичные и дельтовые фациальные обстановки.

Впервые обнаружен Алтайский сегмент Палеоазиатского океана и проведена его хроностратиграфия (поздний кембрий – ранний ордовик). В кремнистых океанических отложениях установлены 11 конодонтовых зон, ранее выделяемых и используемых в стратиграфии осадочных образований только шельфового генезиса.

Создано новое поколение «Стратиграфических схем» палеозоя (кембрий, ордовик, силур, девон) различных регионов Сибири, утвержденных Межведомственным стратиграфическим комитетом России и являющихся обязательной к использованию основой для Легенд при Государственном геологическом картировании.

# ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОДИНАМИКА И РУДОНОСНОСТЬ УЛЬТРАМАФИТ-МАФИТОВЫХ ААСОЦИАЦИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

*А.Э. Изох*

ФБГУН «Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН», *г. Новосибирск*
izokh@igm.nsc.ru

В результате многолетних исследований ультрамафит-матитового магматизма, в том числе в составе Совместной Советско-Монгольской геологической экспедиции [1], дана систематическая минералого-петрографическая, геохронологическая и геохимическая характеристика и предложены петрологические модели для дифференцированных ультрамафит-мафитовых ассоциаций Центральной и Юго-Восточной Азии. Разработана методика формационного анализа таких массивов, позволяющая проводить палеогеодинамические реконструкции в глубоко эродированных складчатых поясах. Для этого необходимо оценить составы родоначальных расплавов и физико-химических условий его кристаллизации, особенно давление, поскольку с изменением давления меняются минеральные котектики и, следовательно, формируются расслоенные серии разного минерального состава. Важное значение имеет моделирование процессов кристаллизации с учетом давления, содержания воды и фугитивности кислорода с использованием программ «Comagmat», Melts, позволяющих оценить изменение последовательности кристаллизации, минерального состава и геохимии в процессе дифференциации. Наиболее важное значение имеют геохронологические исследования для определения времени становления массивов. Нами в последнее время одновременно используются U-Pb метод (по цирконам) и Ar-Ar (по амфиболу или биотиту). Исследование геохимических и изотопно-геохимических особенностей базитов позволяет оценить особенности магмагенерирующих субстратов и проводить сопоставление с одновозрастными вулканическими ассоциациями. Весьма эффективным при реконструкциях геодинамических обстановок является совместный анализ габброидных и гранитоидных ассоциаций.

Показано, что низкощелочные и низкотитанистые дунит-троктолит-габбровые массивы представляют собой малоглубинные камеры островодужных высокоглиноземистых базальтов. По ним можно реконструировать положение палеосубдукционных зон. Геохронологические исследования позволили обосновать выделение разновозрастных островодужных систем [2]. По совместному расположению одновозрастных расслоенных ультрамафит-мафитовых и плагиогранитных ассоциаций можно и направление этих систем [3]. Так для осевых частей внутриокеанических островодужных систем характерно совмещение низкотитанистые дунит-троктолит-габбронoритовых интрузивов и высокоглиноземистых плагиогранитов, тогда как в тыловых частях совмещаются высокотитанистые габброиды с низкоглиноземистыми плагиогранитами. Используя эти подходы для ЦАСП впервые обосновано выделение своеобразной раннепалеозойской LIP (500–490 Ma), для которой характерно сочетание плюмовых и надсубдукционных базитов и гранитоидных батолитов.

Исследованы закономерности эволюции и пространственного размещения ультрамафит-мафитового магматизма крупных изверженных провинций Азии и показаны особенности формирования Cu-Ni –ЭПГ оруденения. Совместно с А.С.Борисенко впервые обосновано выделение Таримского плюма (290–280 Ma), охватывающего территории

Китая, Монголии и Казахстана и проявившегося в коллизионной обстановке. Сопоставление особенностей магматизма и металлогении Таримской LIP с Сибирской и Эмейшаньской показано, что к центральным областям приурочены крупные и гигантские месторождения Cu-Ni-ЭПГ руд (Норильск, Калатонке, Джанбаошань, Банфук) [3]. Исследование распределения ЭПГ в базальтах Сибирской LIP показало, что максимальные их концентрации характерны для центральных областей Сибирского плюма, тогда как для периферийных областей установлены низкие содержания Pt и Pd, сопоставимые с MORB базальтами [4]. Аналогичная закономерность установлена и для мантийного магматизма Эмейшаньской LIP в Северном Вьетнаме, где благодаря крупноамплитудному сдвигу Ailaoshan-Red River можно исследовать центральные (зона Шонгда) и периферийную части (зона Шонгхиен). Эти особенности геохимии ЭПГ, наряду с изотопией осмия позволяет предполагать, что платиноиды привносятся глубинным мантийным плюмом.

Петрологические исследования последовательности и минералого-петрографических и геохимических особенностей даек тобукского комплекса на Алдане показало, что они относятся к единой низкотитанистой лампроитовой серии, которая аналогична лампроитам Северного Вьетнама. Оливиновые, пироксен-флогопитовые лампроиты, минетты и щелочные сиениты представляют собой продукты дифференциации высокомагнезиальной высококалиевой магмы в глубинной промежуточной камере. Ранняя кристаллизация оливина и хромита и особенности их состава в оливиновых лампроитах позволяет рассматривать платиноносные дуниты Инаглинского массива в качестве кумулятов подобного расплава [5]. Конечным продуктом дифференциации являются сиениты. В процессе дифференциации происходит многоэтапное расщепление фракционированного расплава на силикатную и карбонатную составляющие. Отделяющиеся карбонатитовые расплавы обогащены Ba, Sr, F и РЗЭ.

1. Габброидные формации Западной Монголии // Изох А.Э., Поляков Г.В., Кривенко А.П., Богнибов В.И., Баярбилэг Л. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. 265 с.

2. *Изох А.Э., Поляков Г.В., Гибшер А.С., Балыкин П.А., Журавлев Д.З., Пархоменко В.А.* Высокоглиноземистые расслоенные габброиды Центрально-Азиатского складчатого пояса (геохимические особенности, возраст и геодинамические условия формирования). Геология и геофизика, 1998, т. 39, №11 С. 1565–1577.

3. *Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.* Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геол. и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1159–1187.

4. *Изох А.Э., Медведев А.Я., Федосеев Г.С., Поляков Г.В., Николаева И.В., Палесский С.В.* Распределение элементов платиновой группы в пермотриасовых базальтах Сибирской крупной изверженной провинции //Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 5. С. 1028–1043.

5. *Чайка И.Ф., Изох А.Э.* Дуниты Инаглинского массива (Центральный Алдан) – возможные кумуляты лампроитовой магмы // Геология и геофизика. 2018. Т.59. № 11. С.1815–1826.

# КР-КАРТИРОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ ВЫСОКОБАРИЧЕСКИХ ПОРОД

*А.В. Корсаков*

ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН», *г. Новосибирск*
korsakov@igm.nsc.ru

Метаморфические комплексы, включающие породы сверхвысоких давлений, представляют собой террейны, эксгумированные с глубин >100 км, позволяющие реконструировать геологические процессы протекающие в зонах субдукции. Они образуются в результате субдукционно-коллизионных процессов и встречаются в складчатых областях большинства континентов [1]. Индекс-минералами метаморфизма сверхвысоких давлений являются коэсит и алмаз [2]. Включения коэсита и алмаза обнаружены во многих орогенных комплексах мира, но размер реликтов данных минералов, как правило, не превосходит первых микрон, что вызывает серьезные трудности при их идентификации. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопия) является одним из наиболее чувствительных и неразрушающих методов определения различных полиморфных модификаций углерода, CaCO3, SiO2 и других фаз. Впервые данный подход был использован в работе [3] для определения коэсита в природных образцах. В дальнейшем именно эта методика стала использоваться для однозначной идентификации коэсита [4, 5]. Появление прецизионных моторизованных столиков с точностью позиционирования менее 1 микрона способствовало существенному развитию метода КР-спектроскопии и появлению нового направления – КР-картирования [6, 7]. Развитие данного направления исследований позволило охарактеризовать особенности минералообразующих процессов, протекающих на глубинах более 100 км [8, 9]. С непосредственным участием А.В.Корсакова были разработаны минералого-спектроскопические методы идентификации метаморфогенных кристаллов алмаза, а также сформулированы критерии отличия метаморфогенных алмазов от алмазов, используемых на различных этапах пробоподготовки [10]. Разработка этих критериев, таких как положение и ширина пика алмаза в КР-спектре – важный шаг для исключения грубых ошибок в геодинамических реконструкциях. Результаты наших работ демонстрируют, что КР-картирование кристаллов алмаза, циркона и ряда других минералов позволяет получать карты структурных неоднородностей/дефектов как на поверхности, так и в объеме кристалла [11]. Это продвинуло нас в понимании процессов метаморфогенного алмазообразования, так как аналогичные карты, получаемые методами катодолюминесцентной микроскопии, позволяют исследовать лишь полированную поверхность образца. Для реконструкции метаморфическоий истории высокобарических пород нами предложен новый подход, основанный на вязко-упругом равновесии включения и минерала-хозяина [12]. КР-спектроскопические исследования анизотропных включений кварца в гранате позволяют получать независимые оценки температуры и давления [13]. Данный метод открывает новые возможности для реконструкции термально-метаморфической истории ранее "немых" пород, так как включения кварца широко распространены в большинстве метаморфических пород.

КР-спектроскопические исследования включений минералообразующих сред в различных минералах глубоко субдуцированных коровых пород указывают, что на пике метаморфизма при 1000–1100 °C и 5–6 ГПа в породах Кокчетавского массива (Казахстан) присутствовали флюид, преимущественно водного состава, а также силикатные

и карбонатные расплавы [14–16]. КР-картирование включений в оливинах деформированных лерцолитов – одного из наиболее глубинных типов пород, выносимых кимберлитовыми расплавами, позволили установить, что исходно кимберлитовые расплавы могли быть щелочно-карбонатитовыми, которые изменяют свой состав в сторону ультраосновных расплавов за счет контаминации и ассимиляции мантийных пород [17]. Таким образом, наши исследования демонстрируют, что КР-картирование является мощным методом, открывающим новые возможности и перспективы современных минералого-петрологических исследований, лежащих в основе тектоно-метаморфических и геодинамических построений.


1. *Добрецов, Н.Л., Кирдяшкин, А.Г., Кирдяшкин, А.А.* Глубинная геодинамика. 2-е изд. доп. и перераб. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал ‘ГЕО’, 2001.

2. *Chopin, C., Sobolev, N.V.* Principal mineralogic indicators of UHP in crustal rocks. In: Ultrahigh Pressure Metamorphism (Coleman, R. G., Wang, X., eds.). 1995, Cambridge: Cambridge University Press, 96–131.

3. *Boyer, H., Smith, D.C., Chopin, C., Lasnier, B.* Raman microprobe (RMP) determinations of natural and synthetic coesite. Phys. Chem. Miner., 1985, 12, 45–48.

4. *Корсаков, А.В., Шацкий, В.С., Соболев, Н.В.* Первая находка коэсита в эклогитах Кокчетавского массива. Доклады Российской Академии Наук, 1998, 360(1), 77–81.

5. *Соболев, Н.В., Шацкий, В.С., Вавилов, М.А., Горяйнов, С.В.* Включение коэсита в цирконе алмазосодержащих гнейсов Кокчетавского массива – первая находка коэсита в метаморфических породах на территории СССР. Доклады Академии Наук СССР, 1991, 321(1), 184–188.

6. *Korsakov, A.V., Vandenabeele, P., Theunissen, K.* Discrimination of metamorphic diamond populations by Raman spectroscopy (Kokchetav, Kazakhstan). Spectrochim. Acta Part A, 2005, 61, 2378–2385.

7. *Nasdala, L., Smith, D.C., Kaindl, R., Ziemann, M.A.* Raman spectroscopy: Analytical perspectives in mineralogical research. 2004, doi: 10.1180/EMU-notes.6.7.

8. *Korsakov, A.V.* Application of Raman Imaging in UHPM Research. In: Confocal Raman Microscopy. 2018, Springer, Cham, 237–258.

9. *Korsakov, A.V., Kohn, M.J., Perraki, M.* Applications of Raman Spectroscopy in Metamorphic Petrology and Tectonics. Elements, 2020, 16(2), 105–110,

10. *Perraki, M., Korsakov, A.V., Smith, D.C., Mposkos, E.* Raman spectroscopic and microscopic criteria for the distinction of microdiamonds in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from diamonds in sample preparation materials. Am. Mineral., 2009, 94(4), 546–556.

11. *Korsakov, A.V., Toporski, J., Dieing, T., Yang, J., Zelenovskiy, P.* Internal diamond morphology: Raman imaging of metamorphic diamonds. J. Raman Spectrosc., 2015, 46, 880–888.

12. *Zhukov, V., Korsakov, A.* Evolution of host-inclusion systems: a visco-elastic model. J. Metamorph. Geol., 2015, 33(8), 815–828.

13. *Alvaro, M. et al.* Fossil subduction recorded by quartz from the coesite stability field. Geology, 2020, 48, G46617.1, doi: 10.1130/G46617.1.

14. *Корсаков, А.В., Головин, А. В., Диинг, Т., Топорски, Я.* Флюидные включения в породообразующих минералах метаморфических пород сверхвысоких давлений

(Кокчетавский массив, Северный Казахстан). Доклады Академии Наук, 2011, 437(4), 530–535.

15. *Korsakov, A. V., Hermann, J.* Silicate and carbonate melt inclusions associated with diamonds in deeply subducted carbonate rocks. Earth Planet. Sci. Lett., 2006, 241, 104–118.

16. *Mikhno, A. O., Korsakov, A. V.* $K_2O$ prograde zoning pattern in clinopyroxene from the Kokchetav diamond-grade metamorphic rocks: Missing part of metamorphic history and location of second critical end point for calc-silicate system. Gondwana Res., 2013, 23(3), 920–930.

17. *Golovin, A. V., Sharygin, I. S., Korsakov, A. V., Kamenetsky, V. S., Abersteiner, A.* Can primitive kimberlite melts be alkali-carbonate liquids: Composition of the melt snapshots preserved in deepest mantle xenoliths. J. Raman Spectrosc., 2020, 51 (9), 1849–1867.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ АЛМАЗА

*Ю.Н. Пальянов*

ФГБУН «Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН», *г. Новосибирск*
palyanov@igm.nsc.ru

По современным представлениям алмаз образуется в широком диапазоне P-T параметров и окислительно–восстановительных условий, а существующие модели допускают его кристаллизацию в различных средах. Экспериментальный подход позволяет рассмотреть ряд нерешенных и дискуссионных вопросов генезиса алмаза, касающихся состава среды кристаллизации, P-T параметров, флюидного режима, источников углерода, а также процессов и механизмов кристаллизации. Для решения актуальных задач в области экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии мантии Земли, а также роста кристаллов алмаза создан научно-технический комплекс высоких давлений на базе аппаратов БАРС, разработанных в ИГМ СО РАН.

Проведены экспериментальные исследования процессов кристаллизации алмаза в различных системах, моделирующих мантийные алмазообразующие среды: силикатные, сульфидные, карбонатные, хлоридные, металлические и карбонатно-силикатные расплавы ($\pm H_2O$, $\pm CO_2$, $\pm N_2$), флюиды системы C-O-H-N-S, а также расплавы кимберлитов и пород Кокчетавского массива. Установлено, что граничные условия кристаллизации алмаза в значительной степени зависят от состава среды, P-T параметров и кинетики процессов нуклеации. Экспериментально обосновано, что при P-T параметрах литосферной мантии наиболее эффективными алмазообразующими средами являются металлические (Fe, Ni) расплавы и ультра-щелочные карбонатные и карбонатно-силикатные расплавы/флюиды, содержащие $H_2O$ и $CO_2$ 1].

Исследования реальной структуры алмазов, полученных в разных средах, позволили определить их индикаторные характеристики. Низкие концентрации азота (50–200 ppm) и включения углеводородов характерны для алмазов, синтезированных в металл-углеродных расплавах. Индикаторами неметаллических сред являются высокие (≥1000 ppm) содержания азота и водородсодержащие центры (3107 см$^{-1}$). Кремний-вакансионные центры характерны только для ультра-восстановленных безазотных сред ($fO_2 \leq IW$), а кислород-содержащие центры (1065 см$^{-1}$) – индикаторы окислительных условий ($fO_2$ между CCO и CCO –0,5 лог. ед.).

Экспериментально обоснованы доминирующие сценарии образования углеродных фаз, возможные в различных геодинамических обстановках и связанные с эволюцией состава среды, снижением температуры и в результате окислительно-восстановительных реакций. Впервые экспериментально доказаны механизмы образования алмаза в ассоциации с минералами эклогитового и перидотитового парагенезисов, включающие генерацию $CO_2$ флюида за счет реакций декарбонатизации с последующим восстановлением $CO_2$ до алмаза [2]. Кристаллизация алмаза осуществляется из $CO_2$ флюида или карбонатного расплава при взаимодействии с восстанавливающими агентами: водородом, сульфидами, карбидами или металлами.

Редокс механизм, моделирующий взаимодействие субдуцированных карбонатов с металлсодержащими ($Fe^0$) породами литосферной мантии, исследован в системе карбонат-железо [3]. Разработана методика, позволяющая создавать в кристаллизационной ампуле градиент фугитивности кислорода порядка 4 логарифмических единиц, и, соответственно, редокс фронт. В результате взаимодействия карбонат-железо в одном процессе синтезированы алмазы как в восстановительных (расплав Fe), так и в окислительных (расплав карбоната) условиях за

счет единого источника углерода – исходного карбоната. В зависимости от окислительно-восстановительных условий, алмазы резко контрастны по составу включений, содержанию дефектно-примесных центров и изотопному составу углерода, что позволяет объяснить возможную природу гетерогенности природных алмазов по указанным характеристикам.

Впервые предложена и экспериментально обоснована модель образования алмаза в условиях мантии Земли при воздействии электрического поля на карбонатные и карбонатно-силикатные расплавы, соответствующие по составу природным алмазообразующим средам [4]. Установлено, что за счет разности потенциалов (0,4–1 вольт) происходит экстракция углерода из карбонатов и кристаллизация алмаза на катоде в ассоциации с мантийными минералами. В изученном процессе карбонаты являются главными компонентами среды кристаллизации алмаза и единственным источником углерода. Полученные результаты ясно демонстрируют, что электрические поля могут значимо влиять на мантийные минералообразующие процессы.

Для моделирования процессов генезиса алмаза в металл-углеродных расплавах экспериментально исследовано влияние содержания серы в системе $Fe_9Ni_1$-C на растворимость углерода, процессы роста и дефектно-примесный состав алмаза. Учитывая существенное снижение растворимости углерода в расплаве (от 6,6 до 0,4 мас %) с увеличением содержания серы (от 0 до 22 мас %), экспериментально продемонстрировано, что образование алмаза в процессе сульфидизации является одним из вероятных механизмов генезиса алмаза в восстановленных доменах мантии Земли, который реализуется по двум сценариям: (1) за счет смешения металл-углеродных и сульфидных расплавов и (2) в результате миграции серного флюида/расплава через силикатную матрицу к металл-углеродному расплаву [5].

Разработки и исследования в области высоких давлений, включающие комплексные исследования по росту алмазов, изучению их реальной структуры и свойств привели к крупному практическому достижению – выращиванию монокристаллов алмаза массой до 10 карат, реализованному впервые в отечественной практике. Получены приоритетные результаты по структуре и механизмам образования примесных центров в алмазе с участием N, B, P, H, O, Ni, Co, Si, Ge, Sn и Eu, представляющие как кристаллохимический, так и прикладной интерес. Разработаны методы создания функциональных монокристаллов алмаза с заданными свойствами и доказана реальная перспективность их высокотехнологических применений в качестве алмазных наковален, детекторов ионизирующих излучений, элементов квантовой электроники, рентгеновской и инфракрасной оптики.

Работа выполнена по госзаданию ИГМ СО РАН при поддержке РНФ (грант № 19-17-00075)

1. *Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Borzdov Yu.M. et al.* Diamond formation from mantle carbonate fluids // Nature, 1999.V. 400. P. 417–418.

2. *Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Borzdov Yu.M. et al.* Diamond formation through carbonate-silicate interaction // Amer. Mineral., 2002. V. 87. N 7. P. 1009–1013.

3. *Palyanov Yu.N., Bataleva Yu.V., Sokol A.G. et al.* Mantle–slab interaction and redox mechanism of diamond formation // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013. V. 110. № 51. P. 20408–20413.

4. *Palyanov Yu.N., Borzdov Yu.M., Sokol A.G. et al.* Diamond formation in an electric field under deep Earth conditions // Science Advances, 2021; 7 : eabb4644.

5. *Palyanov Yu.N., Borzdov Yu.M., Bataleva Yu.V. et al.* Diamond formation during sulfidation of metal–carbon melts // Diamond and Related Materials, 2021. V.120. 108660.

# СЛЕД СУБДУКЦИИ В МАГМАТИЗМЕ ОБСТАНОВОК КОНВЕРГЕНЦИИ И ВНУТРИПЛИТНОЙ АКТИВИЗАЦИИ (КАМЧАТКА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЗИЯ)

*А.Б. Перепелов*

*ФГБУН «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН», г. Иркутск*

alper@igc.irk.ru

Субдукционные процессы на границах конвергенции литосферных плит происходят с погружением океанической литосферы в литосферную и астеносферную верхнюю мантию. Этот процесс определяет возможность мантийно-корового рециклинга вещества как на этапе собственно субдукции с образованием типичных известково-щелочных серий пород (IAB), так и по завершению субдукции. В последнем случае это приводит к формированию магм внутриплитного (WPB) и переходного типов (IAB-WPB) с изотопно-геохимическими признаками субдуцированного материала. В данном докладе показаны результаты более чем 40-летних исследований, показывающие роль субдуцированной океанической литосферы в формировании магм внутриплитного и переходного типов в обстановках конвергенции (Камчатка) и внутриплитной активизации (Центральная Азия).

В кайнозойской истории магматического развития активной континентальной окраины Камчатки сформированы разновозрастные надсубдукционные вулканические пояса, при этом проявлены породы с внутриплитными и переходными геохимическими характеристиками. Магматизм этой структуры, наряду с преобладающими сериями пород IAB типа, характеризуется проявлениями K-Na щелочно-базальтовых, щелочно-базальт-трахит-комендитовых и калиевых щелочных магм, а также специфического Mg#-андезитового и NEB-адакитового магматизма [1–5].

В начале кайнозоя, вслед за завершением формирования ранне-среднеэоценового Западно-Камчатского надсубдукционного вулканического пояса (~53–38 млн лет) [1], на территории Западной Камчатки в условиях внутриплитной активизации проявлется K-Na щелочно-базальтовый магматизм, геохимические характеристики которого сходны с E-MORB и WPB (~46–44 млн лет).

Далее, начиная с позднего эоцена и раннего олигоцена на Западной Камчатке последовательно, но с наложением по времени, вначале проявляется K-Na умеренно-щелочной и щелочной магматизм (~34–31 млн. лет) а затем и ультракалиевый щелочной (~35–17 млн лет) и шошонитового магматизма (~21–14 млн лет).

Следующий крупный этап геодинамического и магматического развития Камчатки связан с развитием субдукции со стороны Тихого океана. Полномасштабное развитие вулканизма островодужного геохимического типа (IAB), согласно имеющимся изотопным датировкам, началось в Срединном хребте в раннем плиоцене (~4.0 млн. лет) и продолжалось в среднем плиоцене до рубежа в ~ 3 млн лет 4, 5]. Важно отметить, что почти одновременно с проявлениями крупнообъемного магматизма островодужного типа в Срединном хребте на территории Западной Камчатке зафиксирован эпизод магматизма WPB типа (~3.8–2.8 млн лет).

После завершения развития надсубдукционного вулканического пояса Срединного хребта в среднем плиоцене, его магматическая активность возобновляется только через ~1 млн. лет на границе позднего плиоцена и в раннем плейстоцене (~2.1–1.35 млн. лет). Это этап связан с развитием магматизма внутриплитного геохимического типа, а именно K-Na щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии пород [4, 5]. Далее и до голоцена на

территории Срединного хребта продолжаются проявления щелочно-базальтовых магм переходного IAB-WPB типа [2, 5].

В среднем и позднем плиоцене проявляется магматическая активность Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций (~3.4–2.7 млн лет). С этой структурой связано проявление Mg#-андезитового и NEB-адакитового вулканизма. Длительный период магматической активности Малко-Петропавловской зоны заканчивается проявлениями в позднем плиоцене высокониобиевых базальтоидов (HNB), имеющих переходные IAB-WPB характеристики (~2.1–2.0 млн лет) 5].

Для всех пород WPB или IAB-WPB Западной Камчатки, Срединного хребта и зон поперечных разломных дислокаций отмечаются изотопно-геохимические признаки участия в магмообразовании вещества субдуцированной океанической литосферы.

Исследования позднеолигоцен-плиоценовых щелочно-базальтовых комплексов Центральной Азии (~33–2 млн лет), а именно Южного Прибайкалья и Монголии, проводились в последние 10 лет [6, 7]. Обнаружение в базальтоидах и в перидотитовых включениях карбонатных (кальциты, доломиты) и сульфидных фаз, а также специфические особенности распределения в породах ряда редких элементов (обеднение HREE, Th, U и PGE) свидетельствуют об участии в происхождении щелочно-базальтовых магм региона рециклированного вещества высокобарически преобразованной (эклогитизированной) океанической литосферы [7].

Наличие карбонатов в субликвидусных минералах и мантийных породах свидетельствует о высокой роли углерод-содержашего флюидов в процессах метасоматоза субконтинентальной литосферной мантии. Источником силикатно-карбонатного вещества была, вероятно, древняя океаническая литосфера, субдуцированная в ходе эволюции Палеоазиатского и Монголо-Охотского океанов. Причиной развития позднекайнозойского вулканизма в Центральной и Северной Монголии могут являться процессы Индо-Азиатского столкновения [6].

1. *Федоров П.И., Коваленко Д.В., Баянова Т.Б. et al.* Раннекайнозойский магматизм континентальной окраины Камчатки // Петрология, 2008. Т. 16, № 3. С. 277–295.

2. *Churikova T., Dorendorf F., Worner G.* Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // J. Petrology, 2001. V.42, № 8. P. 1567–1593.

3. *Volynets O.N.* Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // International Geological Review, 1994. V.36, № 4. P. 373–405.

4. *Volynets A., Churikova T., Wörner G. et al.* Mafic Late Miocene – Quaternary volcanic rocks in the Kamchatka back arc region: implications for subduction geometry and slab history at the Pacific-Aleutian junction // Contributions to mineralogy and petrology, 2010. V. 159. P. 659–687.

5. *Перепелов А.Б.* Кайнозойский магматизм Камчатки на этапах смены геодинамических обстановок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2014. 41 с.

6. *Perepelov A.B., Kuzmin M.I., Tsypukova S.S. et al.* Eclogite Trace in Evolution of Late Cenozoic Alkaline Basalt Volcanism on the Southwestern Flank of the Baikal Rift Zone:

Geochemical Features and Geodynamic Consequences // Dokl. Earth Sci., 2017. V. 476, № 2. P. 1187–1192.

7. *Perepelov A., Kuzmin M., Tsypukova S. et al.* Late Cenozoic Uguumur and Bod-Uul Volcanic Centers in Northern Mongolia: Mineralogy, Geochemistry, and Magma Sources // Minerals, 2020. V. 10, № 7, (612).

# ПЕТРОЛОГИЯ КОНВЕРГЕНТНЫХ И ПОСТСКОЛЛИЗИОННЫХ УЛЬТРАМАФИТ-МАФИТОВЫХ И ГРАНИТОИДНЫХ СЕРИЙ

*А.А. Цыганков*

ФГБУН «Геологический институт
им. Н.Л. Добрецова СО РАН», *г. Улан-Удэ*
tsygan@ginst.ru

Взаимосвязь магматизма и тектоники является одними из приоритетных направлений современной геологии. Не смотря на очевидные успехи исследований, проводившихся в этом направлении многие десятилетия, геодинамическая (геотектоническая) интерпретация условий образования конкретных магматических комплексов и ассоциаций и связанного с ними магматогенного оруденения, по прежнему, представляет собой актуальную проблему. Решение этой проблемы видится в детальном петрологическом, геохронологическом и изотопно-геохимическом изучении магматических образований, что позволяет выявить ключевые параметры, являющиеся основой геодинамических построений.

В настоящем сообщении рассматривается петрология ультрамафитит-мафитовых ассоциаций Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса (Северное Прибайкалье), сформировавшихся в конвергентной (островодужной, коллизионной) геодинамической обстановке [1], и петрология гранитоидов одного из крупнейших на Земле Ангаро-Витимского гранитоидного батолита [2, 3], становление которого связано с воздействием мантийного плюма на постколлизионном этапе геодинамической эволюции Байкальской складчатой области.

В составе Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса (БМП) совмещены ультрамафит-мафиты офиолитового, островдужного и синколлизионного типов, сменявшх друг друга во времени и фиксирующих смену геодинамических обстановок. Офиолиты принадлежат к надсубдукционному типу и включают разрозненные массивы реститовых гипербазитов ассоциирующих с вулканитами островодужного типа. Для офиолитов БМП характерно отсутствие дайкового комплекса и редуцированный комплекс дифференцированных ультрабазит-базитов. Островодужная ассоциация включает метавулканиты контрастной базальт-риолитовой и последовательно дифференцированной базальт-андезит-риолитовой серий, сопровождающиеся многофазными интрузиями дифференцированных ультрабазит-базитов и габбро-тоналит-плагиогранитов.

Магматические формации синколлизионного типа представлены интрузиями ультрамафит-мафитов (габбро-перидотит-дунитовая формация), синметаморфическими эндербит-аляскитами и мигматит-плагиогранитами. Формирование синколлизионных ультрамафит-мафитов происходило после главного этапа метаморфизма; они не сопровождаются эффузивными комагматами и кислыми дифференциатами и приурочены к региональным сдвиговым швам; для них характерно многофазное строение с гомодромной последовательностью внедрения, высокая степень дифференцированности при слабо выраженной расслоенности и разных трендах дифференциации интрузивных фаз, образованных из магм с повышенным содержанием флюида при давлениях порядка 4–7 кбар.

Позднепалеозойская гранитоидная провинция Западного Забайкалья (Ангаро-Витимский батолит, АВБ) занимает площадь более 200 000 км$^2$. При средней мощности «гранитного слоя» 7–10 км его объем, с учетом эродированной части (1–3 км), может составлять от 0.7 до 2.0 млн км$^3$, что сопоставимо с крупнейшими на Земле изверженными провинциями (LIPs), например, с траппами Тунгусской синеклизы.

В составе АВБ выделено пять породных ассоциаций (комплексов) гранитоидов, формировавшихся одновременно или с большим временным перекрытием в течение 40–45 млн лет с 325 до 280 Ма [2]. По данным «детритовой» и «коренной» геохронологии выделяются два этапа магматизма с максимумами 315 и 285 Ма, отражающие максимальную интенсивность корового и смешанного мантийно-корового гранитообразования. В целом, при формировании АВБ состав гранитоидов эволюционировал от высококалиевых известково-щелочных «коровых гранитов» к высококалиевым «мантийно-коровым», сменившихся щелочными гранитоидами. «Коровые» граниты содержат ксенолиты и фрагменты частично расплавленных метатерригенных пород, их изотопный состав ($\delta O^{18}$‰ : 8.3–10.9 (Zrn); 10.4–14.5 (Qtz); $\varepsilon Nd_{(T)}$ : –5 ÷ –20; $T_{Nd}$(DM-2) = 1.5–2.2 Ga; $\varepsilon Hf_{(T)}$ : –8 ÷ –20; $T_{Hf}$(DM-2) = 1.5–2.2 Ga; Isr ~0.707) указывает на палео-мезопротерозойский коровый источник магм. Еще одним примером коровых гранитоидов является Главный (Колымский) батолитовый пояс, расположенный на северо-востоке Азиатского континента. Для этих гранитоидов также характерны коровые ксенолиты и изотопные характеристики ($\varepsilon Nd_{(T)}$ = –1.9 ÷ –15; $T_{Nd}$(DM–2) = 1.1÷2.2 Ga) указывающие на древнекоровый источник магм.

Мантийно-коровые гранитоиды отличаются повышенной основностью, часто содержат мафические микрогранулярные включения, сопровождаются минглинг-дайками и синплутоническими мафическими интрузиями, отражающими разноглубинные процессы взаимодействия мантийных мафических и коровых салических (гранитоидных) магм. Подобными гранитоидами сложена Значительная часть Хангайского батолита Северной Монголии, крупные плутоны в составе Калбо-Нарымского батолита Северо-Восточного Казахстана, большая часть Каа-Хемского батолита в Восточной Туве. Изотопный состав гранитоидов, содержащих ММЕ или минглинг-дайки, отличается от коровых гранитов слабоотрицательными или околонулевыми значениями $\varepsilon Nd_{(T)}$ = –5 ÷ 1; $\varepsilon Hf_{(T)}$ = –3 ÷ 2 величина которых определяется пропорциями смешения магм.

Позднепалеозойская гранитоидная провинция Западного Забайкалья сформировалась на континентальной коре в пределах рифейской изотопной провинции гетерогенной по геологической и изотопной структуре. Эта гетерогенность проявлена как по латерали, так и в разрезе коры. Пространственно сближенные, синхронные, сходные по химическому составу, но изотопно разные гранитоиды формировались за счет разноглубинных, разновозрастных источников при варьирующей добавке ювенильного компонента. Гранитоиды «смешанного» мантийно-корового типа представляют собой продукт смешения трахибазальтов с коровыми выплавками с последующей дифференциацией гибридных магм.

По своему месту в геологической истории Забайкалья позднепалеозойский магматизм является посторогенным [3], но инициирован и развивался он под воздействием мантийного плюма.

1. *Цыганков А.А.* Магматическая эволюция Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса в позднем докембрии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 306 с.

2. *Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M. et al.* Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Paleozoic post-collisional igneous province Transbaikalia // Lithos. 2011. V. 125. P. 845–874.

3. *Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б. и др.* Геодинамика позднепалеозойского батолитообразования в Западном Забайкалье // Петрология. 2017. Т. 25. № 4. С. 395–418.

# ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

*Д. А. Бушнев*

«Институт геологии ФГБУН ФИЦ Коми НЦ УрО РАН», *г. Сыктывкар*
boushnev@geo.komisc.ru

Современная геохимия органического вещества (ОВ) осадочных пород охватывает широкий круг вопросов. К ним относятся реконструкция видового состава организмов-продуцентов по химическому составу биомаркеров, химические механизмы консервации ОВ в диагенезе, химическое строение и молекулярный состав ОВ, изотопия стабильных элементов ОВ на уровне всего вещества, его фракций и отдельных молекул, химизм процессов нафтидогенеза. Объекты исследования – это горючие сланцы и ископаемые угли, нефтематеринские породы и нефти, природный газ, битумы, современные и молодые осадки. В разные годы значительный вклад в изучение геохимии ОВ внесли такие выдающиеся учёные как В. И. Вернадский, Н. Б. Вассоевич, Э. М. Галимов, А. Э. Конторович. Наиболее известны следующие отечественные научные школы: Ленинградская – ВНИГРИ, Московская – ВНИГНИ, МГУ, ГЕОХИ, ИГиРГИ, Новосибирская – ИНГГ СО РАН, СНИИГГиМС, Томская – ИХН СО РАН.

Наиболее интересные результаты изучения состава ОВ пород и нефти достигнуты за счёт состоявшегося в 60–80-е годы XX века перехода к исследованиям на молекулярном уровне. Здесь важно подчеркнуть связь результатов геохимического изучения ОВ пород, биохимии живых организмов, развития химико-аналитических методов исследования. Самым впечатляющим открытием было обнаружение ископаемых молекул-биомаркеров – соединений, непосредственно происходящих от биохимических компонентов живого ОВ. Сейчас число таких соединений исчисляется сотнями, если не тысячами. Важнейшим результатом стало открытие главной фазы и главной зоны нефтеобразования, имеющее непререкаемое значение для практики геологоразведочных работ на нефть и газ и развития теории нефтеобразования. Колоссальное значение имеет обнаружение фракционирования изотопов стабильных элементов, прежде всего углерода в био- и геохимических процессах, а затем становление возможностей изотопных исследований на уровне отдельных молекул.

В каких условиях происходит наиболее эффективное захоронение ОВ в осадках? Положение о диагностике наличия сероводорода в наддонных водах (аноксии) палеобассейна и его влиянии на накопление ОВ широко дискутировалось. Сероводород в осадке, поровых и наддонных водах появляется за счёт процесса сульфатредукции, то есть окисления ОВ сульфат ионом с участием сульфатредуцирующих бактерий. Диагностика палеоаноксии в фотическом слое в настоящее время основывается на анализе специфических для фототрофных серобактерий семейства *Chlorobiaceae* биомаркеров – производных арилкаротиноидов. Их присутствие доказано в битумоиде пород важнейших углеродистых толщ – среднефранской доманиковой, верхнеюрской горючесланцевой. Изотопные исследования на молекулярном уровне подтвердили, что производные арилкаротиноидов доманика происходят именно из биомассы *Chlorobiaceae*. В условиях аноксии главным химическим процессом сохранения ОВ в осадке является его осернение. Это процесс взаимодействия сероводорода и полисульфидов поровых вод с липидами и углеводами исходного ОВ молодого осадка. Следствием этих реакций является формирование широкого спектра серосодержащих структур ископаемого ОВ и нефти – тиофенов, циклических сульфидов, бензо- и дибензотиофенов.

Большая часть ОВ осадочных пород нерастворима, это кероген. Основные методы анализа керогена деструктивные – пиролиз и хемолиз, а также спектральные, например ИК- и ЯМР- спектроскопии. Пиролиз с последующим молекулярным анализом продуктов даёт возможность изучить структуру отдельных фрагментов ископаемого ОВ. Образование при пиролизе керогена доманиковых отложений *н*-алкилтиофенов и *н*-алкилбензотиофенов свидетельствует о вовлечении в реакции природного осернения в раннем диагенезе липидной фракции исходного ОВ. Для продуктов пиролиза керогена юрских горючих сланцев характерны короткоцепочечные тиофены, например 2,5-иметилтиофен, что свидетельствует о вовлечении в процесс осернения в данном случае также и углеводов. Образование суммы *н*-алканов и *н*-алкенов-1 при пиролизе увязывается с сохранением в составе ОВ пород полимерлипидов устойчивых к факторам деградации в диагенезе. Рост концентрации 2,5-диметилтиофена при пиролизе керогена всё более и более углеродистых юрских сланцев Восточно-Европейской платформы сопровождается снижением суммы содержания *н*-алканов и *н*-алкенов-1, что позволяет констатировать смену механизмов консервации исходного ОВ в диагенезе с прямого наследования на осернение, в том числе и углеводов.

Спектральные исследования керогена позволяют выяснить какие функциональные группы характеры для того или иного нерастворимого ОВ пород или какие типы химического окружения характерны для атомов углерода, слагающих кероген. Важнейшим постседиментационным процессом, который характерен для углеродистых толщ, содержащих аквагенное ОВ, является нефтегазообразование. При достижении породами главной зоны нефтеобразования (примерно 1,5–2 км глубины) ОВ начинает генерировать всё большие количества битумоида, который способен к эмиграции из породы и миграции в ловушки – будущие залежи. Прогрев верхнеюрских и доманиковых сланцев в автоклаве в присутствии воды позволил продемонстрировать нарастающее образование термобитума с ростом температуры, а значит, и смоделировать природный процесс нефтеобразования. Спектральными методами была установлена сонаправленность лабораторного изменения ОВ пород под действием температуры и имеющиеся отличия от природного катагенеза. Показано укорочение *н*-алкильных цепей, нарастание ароматичности остаточного керогена при катагенезе. Изучение образовавшегося термобитума дало возможность проследить ход изменений отдельных параметров по составу углеводородов-биомаркеров определяемых генотипом исходного ОВ и его катагенезом.

Изотопные исследования являются неотъемлемой частью работ по геохимии ОВ. Данные о составе изотопов углерода в отдельных молекулах, полученные методом GC-IRMS, позволили решить несколько интересных задач. Впервые было показано, что для верхнеюрских горючих сланцев Европейской части и баженовских пород Сибири характера общая изотопная метка – изотопно утяжелённая структура состава *н*-$C_{26}$. Впервые, по сопоставлению изотопных профилей углерода нормальных алканов битумоидов доманика и нефтей верхнедевонского комплекса Тимано-Печорской провинции подтверждена их связь, то есть роль ОВ доманика в фактической нефтеносности. Получены первые изотопные сведения о закономерном изменении изотопного состава углерода при циклизации и ароматизации *н*-алкильной цепи, что открывает возможности для изотопного исследования механизмов преобразования органического вещества в осадочных породах.

Роль аноксии, химические механизмы консервации ОВ, его химическая структура, модель процесса нефтегазообразования – это не полный перечень достигнутых при изучении ОВ углеродистых пород результатов. Развитие исследований в области геохимии ОВ – это углублённое изучение природных процессов его накопления и их

моделирование, изотопные исследования химических механизмов преобразования ОВ, поиск новых биомаркеров для более точной диагностики видового состава ископаемых организмов, раскрытие молекулярных механизмов преобразования керогена в нефтяные углеводороды.

# ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОСАДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ БОЛЬШОГО КАВКАЗА В МЕЗОЗОЕ-КАЙНОЗОЕ: ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

*Ю.О. Гаврилов*

ФГБУН «Геологический институт РАН», *г. Москва*
yugavrilov@gmail.com

Осадочные комплексы Большого Кавказа на протяжении альпийского этапа его развития (~200 млн лет) формировались под влиянием различных факторов, которые взаимодействуя и дополняя друг друга, определяли геохимическую специфику отложений и их разнообразие.

Особое место в структуре Б. Кавказа занимает многокилометровый юрский терригенный комплекс ($J_{1-2}$) [1]. При кажущейся однородности толщи, разные его части характеризуются различными геохимическими особенностями, которые возникли под влиянием многих факторов. Эти факторы являются типичными при образовании крупных терригенных комплексов в сходных климатических и геодинамических обстановках других регионов.

Установлено, что значительное влияние на геохимические свойства отложений $J_{1-2}$ являлся фактор источников сноса осадочного материала. В осевой части прогиба начальный этап формирования комплекса (базальная толща ~ 1 км) характеризовался сносом материала с внутрибассейновых поднятий, сложенных гранитогнейсами. Для накопившихся отложений характерно крайне низкое содержание многих химических элементов (Fe <2%; Mn – следы, Ti, P, Cr, Ni, V, Cu, Co, и др.), которое заметно ниже их кларковых значений. Только в позднем плинсбахе, когда трансгрессия перекрыла эти источники, геохимический облик пород изменился. В отложениях периферийной части бассейна Сев. Кавказа влияние локальных источников осадочного материала – серпентинитовых массивов, напротив, было весьма ощутимо: высокие содержания Cr (до 4500 ppm), Ni и некоторых других элементов. С переотложением материала из кор выветривания этих массивов связано появление железорудных горизонтов в основании юрской толщи, а также в начале аалена при образовании на фоне масштабного падения уровня моря оолитовых Fe-руд – аналогов рудам лотарингского типа Западной Европы. Развитие кор и бокситов было обусловлено фактором гумидного субтропического климата. Его следствием было также широкое развитие озерно-болотных систем по периферии бассейна, которые генерировали и поставляли в водоем большие массы органического вещества (ОВ), Ме-органических соединений. Это приводило к интенсивным диагенетическим преобразованиям осадков и формированию скоплений сидерита вплоть до рудных концентраций. Максимальные количества ОВ поставлялись в восточную часть бассейна с территории обширного дельтового комплекса крупной палеореки («Палео-Волга»), что обусловило геохимическую асимметрию осадочного комплекса. Окисление ОВ происходило как в осадках, так и в водной толще, что приводило к генерации больших масс углекислоты и ацидификации вод бассейна («углекислотное заражение»). $H_2S$-заражение вод в юрском бассейне не подтверждено.

Колебания уровня моря (в том числе эвстатические) являлись мощным фактором, влиявшим как на структуру толщ, так и на их геохимию. На фоне трансгрессий накапливались осадки, обогащенные ОВ, на фоне регрессий – оолитовые Fe-руды.

Влияние фактора субаквальной гидротермальной деятельности было локальным и незначительным по масштабам проявления. К другим факторам, влиявшим на геохимию

отложений следует отнести высокую скорость седиментации, сейсмичность, гомогенизацию отложений в результате гравитационных процессов, некоторые другие.

Позднеюрский этап развития палеобасейна Б. Кавказа ознаменовался резкой сменой гумидного климата на аридный, что сопровождалось изменением режима седиментации и геохимических обстановок: формировалась так называемая «карбонатная платформа» (известняки, доломиты, толщи эвапоритов).

Во время следующего этапа развития палеобассейна – готерив-маастрихт – сформировался крупный осадочный ритм (1600 м), в нижней части которого преобладают терригенные, а в верхней карбонатные толщи. Переходный между ними интервал – альб-сеноман – резко выделяется по литолого-геохимическим параметрам, что связано с залегающими в нем горизонтами углеродистых отложений, являющихся региональным отображением глобальных событий OAEs (Oceanic Anoxic Events) [2]. Для объяснения генезиса этих углеродистых горизонтов автором разработана модель их формирования, в которой – в отличие от «аноксидной» модели – главным действующим фактором является резкий рост биопродуктивности органикостенного фито- и бактериопланктона в связи с быстрой эвстатической трансгрессией и поступлением в водоемы больших количеств биофильных элементов.

В разрезах Восточного Кавказа литологически и геохимически хорошо выражены отложения мел-палеогеновой границы, в которой установлен прослой с повышенным содержанием Ir и других платиноидов. Обосновано диагенетическое происхождение этой иридиевой аномалии, в отличие от импактной гипотезы о её природе.

В палеоген-неогеновых осадочных комплексах региона на фоне относительно стабильного глинисто-карбонатного осадконакопления выделяются три уровня углеродистых отложений с аномальными геохимическими характеристиками.

На палеоцен/эоценовой границе залегает пласт (0.5 – 4 м), содержащий высокие концентрации ОВ, многих элементов – V, Ni, Cr, Zn, Cu, Cr, Mo, Se, Ag, Au и др.; в нем зафиксированы резкие отрицательные аномалии $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$. Этот горизонт соответствует глобальному экологическому и климатическому событию (55,8 млн лет, длительность ~ 150 тыс. лет), когда на Земле произошло потепление на 8–10 °С. Аналогичные изотопные аномалии отмечены во всех разрезах Мира. Для генетических реконструкций горизонта приложима разработанная нами модель для OAEs (см. выше).

Другие две толщи углеродистых отложений – кумская свита (бартон) сложена карбонатными породами (40 м) и майкопская серия (олигоцен-нижний миоцен) представлена в основном глинистыми и в меньшей степени песчаными породами (1,2 км). Обе толщи образовались в бассейнах с дефицитом кислорода в водной толще. Соотношение индикаторных элементов (Mo, Mn) позволяет оценить динамику развития аноксидных обстановок в майкопском палеобассейне, оценить их интенсивность [3]. Эпизодически аноксия развивалась также в чокракском бассейне (средний миоцен).

1. *Гаврилов Ю.О.* Динамика формирования юрского терригенного комплекса Большого Кавказа: седиментология, геохимия, постдиагенетические преобразования. М.: ГЕОС, 2005. 301 с.

2. *Gavrilov Yu. O., Shcherbinina E. A., Aleksandrova G.N.* Mesozoic and Early Cenozoic Paleoecological Events in the Sedimentary Record of the Northern Peri-Tethys: An Overview // Lithology and Mineral Resources. 2019. N 6. P. 524–543.

3. *Gavrilov Yu., Nedumov R., Shchepetova E. et al.* Stratigraphy, sedimentology and geochemistry of the Oligocene – Lower Miocene Maikop group in Dagestan, NE Caucasus // Jour. Petrol. Geol. 2021. V. 44. Issue 3. P. 385–412. DOI: 10.1111/jpg.12798

# ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕЛАГИЧЕСКИХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОКЕАНА

*А.В. Дубинин*

ФГБУН «Институт океанологии им. П.П .Ширшова РАН», *Москва*
dubinin_av@mail.ru

Океаны и моря являются бассейнами седиментации основной массы осадочного материала. Редкоземельные элементы (РЗЭ) – уникальная по близости химических свойств группа из 15 элементов, которая обладает способностью сохранять черты состава источников вещества океанских отложений. Перенос РЗЭ в океан в результате процессов выветривания и гидротермальной активности осуществляется в виде пород и минералов и в составе природных растворов. Если в приконтинентальном литогенезе преобладают процессы отложения вещества речных взвесей, аэрозолей, при абразии берегов, ресуспензии осадков и ледникового разноса пород земной коры, то в пелагическом литогенезе основным процессом перевода РЗЭ в донные отложения является сорбция и осаждение из раствора океанской воды. Преобладание растворенных РЗЭ в качестве источника для донных отложений пелагиали приводит к изменению их состава в сорбционных процессах – растет отрицательная аномалия церия (Ce an) и дефицит легких РЗЭ относительно тяжелых (L/H) 1]. Состав РЗЭ донных отложений, определяющийся аутигенными минералами, постепенно меняется от близкого к составу сланца (например, PAAS – Постархейский Австралийский сланец) до состава РЗЭ океанской воды (конечный член ряда изменения состава). Другим конечным членом изменения состава РЗЭ в океане являются пелагические глины (рис.). Их состав определяют гидрогенные оксигидроксиды Mn и Fe и биогенный апатит. На западном фланге ВТП в зоне низких скоростей накопления осадочного вещества ниже критической глубины карбонатонакопления накапливаются наиболее богатые РЗЭ (в сумме до 3000 мкг/г) пелагические глины с повышенными содержаниями гидротермально-осадочных оксигидроксидов Fe и Mn и хемогенным апатитом. Они рассматриваются как потенциальные руды на РЗЭ в отложениях океана.

Пелагические глины представляют собой полигенные образования с положительной аномалией церия, которая наследуется от гидрогенных оксигидроксидов Fe и Mn, диспергированых в осадках, и их обособлений, представленных марганцевыми микроконкрециями (МК) 1]. Состав РЗЭ пелагических глин можно получить, если смешать оксигидроксиды Fe и Mn гидрогенных корок и глинистого вещества (рис.). Снижение величины Ce an в пелагических глинах обычно обусловлено высокими концентрациями апатита и гидротермальными оксигидроксидами Mn и Fe, что характерно для пелагических глин Тихого океана в отличие от Атлантического (рис). Fe-Mn корки Тихого океана заметно обогащены кобальтом и обеднены церием относительно корок Атлантического океана. Основная причина обогащения кобальтом – повышенный поток марганца из гидротермальной системы срединных хребтов дна океана, которая фиксируется огромной площадью распространения металлоносных осадков в Тихом океане.

Марганцевые микроконкреции в отличие от Fe-Mn конкреций (ЖМК) повсеместно встречаются в пелагических окисленных осадках океанов. Они достигают размера 1–2 мм в диаметре, их распространенность увеличивается в осадках с низкими скоростями седиментации, растут МК в верхней обводненной пленке осадка. Их можно выделить из осадка и разделить на размерные фракции. Химический состав МК меняется с ростом размера фракции в зависимости от биопродуктивности водной толщи океана (потока

органического вещества). В непродуктивных областях в Тихом океане с ростом размера фракции МК в их составе РЗЭ растет аномалия церия, в продуктивных областях она уменьшается вместе с заметным ростом Mn/Fe. Величина Mn/Fe определяет степень диагенетических изменений в составе конкреций и микроконкреций. Чем больше эта величина, тем выше степень участия процессов субокислительного диагенеза в составе Fe-Mn отложений. Сравнение составов МК и ЖМК показывает, что величина Ce an в МК всегда больше, чем в конкрециях. Эти различия заключаются не в высоком накоплении церия, а в заметно большем накоплении трехвалентных РЗЭ в конкрециях. Церий в степени окисления 4+ малоподвижен в раннем диагенезе, его отношение к торию ($Th^{4+}$) не меняется в МК и ЖМК в пределах отдельной станции. Исследование состава МК Атлантического океана под электронным микроскопом показало наличие слоистой Fe-Mn фазы обогащенной церием до 8 масс.%. Такое обогащение церия возможно лишь в условиях растворения материала МК и пассивного накопления малорастворимых соединений Ce. В материале ЖМК, контакт которых с придонной водой много больше такового для МК, преимущественное накопление трехвалентных РЗЭ может идти из придонной воды. Это подтверждает изотопный состав Nd, который соответствует изотопному составу придонных вод. Исследование ЖМК, в центре которых находились зубы хищных рыб, показало, что изотопный состав стронция оксигидроксидных слоев конкреций в ряде случаев (4 из 15) совпадал с изотопным составом стронция эмали зубов. Следовательно, скорость роста Fe-Mn оболочки конкреций могла достигать 1мм за 10–100 тыс. лет, а не за миллион лет, если считать, что возраст слоев оксигидроксидов практически равен возрасту ядра из биоапатита.

*Дубинин А.В.* Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.

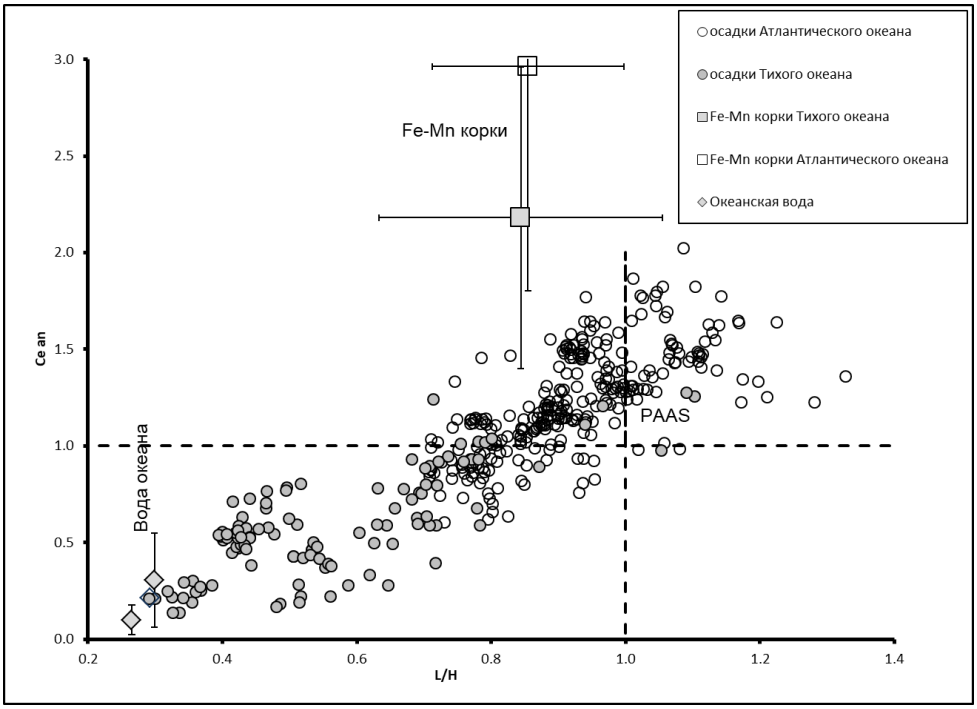



Рисунок. Изменение состава РЗЭ в координатах L/H = ($La/La^{PAAS}$+$2Pr/Pr^{PAAS}$ + $Nd/Nd^{PAAS}$)/($Er/Er^{PAAS}$ + $Tm/Tm^{PAAS}$ + $Yb/Yb^{PAAS}$ + $Lu/Lu^{PAAS}$) и Ce an = ($2Ce/Ce^{PAAS}$/($La/La^{PAAS}$ + $Pr/Pr^{PAAS}$) донных отложений пелагиали Тихого и Атлантического океанов. Доверительный интервал для средних величин Ce an и L/H в океанской воде и Fe-Mn корках соотвествует стандартному отклонению от среднего. Пунктиром показано для PAAS Ce an =1, L/H = 1

# КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕДИМЕНТАЦИИ В ПЛЕЙСТОЦЕНЕ МИРОВОГО ОКЕАНА

*М.А. Левитан*

ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии РАН», *г. Москва*
m-levitan@mail.ru

Лаборатория геохимии осадочных пород была основана в ГЕОХИ АН СССР в 1950 г. А.Б. Роновым. В качестве основной цели работы лаборатории была названа реконструкция литолого-геохимической эволюции стратисферы Земли. С этой целью на протяжении длительного времени академики А.Б. Ронов, В.Е. Хаин и их сотрудники составляли обзорные литолого-палеогеографические карты для крупных стратиграфических подразделений позднего протерозоя и фанерозоя континентов, а также для позднего мезозоя и кайнозоя океанов. Обсчет этих карт с помощью объемного метода А.Б. Ронова [1] позволяет выйти на такие количественные параметры седиментации как площади, объемы, массы сухого осадочного вещества и скорости его накопления. Потоки вещества вычисляются с помощью метода абсолютных масс, широко используемого в мировой морской геологии. Сравнительный анализ полученных параметров в историко-геологической последовательности дает возможность на количественной основе осуществлять искомые литолого-геохимические реконструкции развития стратисферы.

Для современных осадков Мирового океана существуют многочисленные данные. Последняя по геологическому возрасту карта, созданная А.Б. Роновым с соавторами [2], относится к плиоцену. До наших исследований плейстоцена работ по Мировому океану объемным методом А.Б. Ронова в мире не было.

Нами создан комплект из 54 обзорных литолого-фациальных карт в поперечной азимутальной равноплощадной проекции для глубоководного ложа Тихого, Индийского и Атлантического океанов (масштаб 1:35 000 000), а также для ключевых районов подводных континентальных окраин этих океанов (масштабы 1:10 000 000 или 1:20 000 000). Картирование осуществлялось для двух возрастных срезов по «старой» шкале [3]: неоплейстоцена (0.8–0.01 млн лет) и эоплейстоцена (1.8–0.8 млн лет). В качестве фактического материала использовались данные из отчетов по рейсам Международного проекта глубоководного бурения по литологии, стратиграфии, мощностям и физическим свойствам плейстоценовых отложений. В связи с отсутствием сети скважин глубоководного бурения в Северном Ледовитом океане литолого-фациальные карты разновозрастных плейстоценовых отложений для этого океана составить невозможно. В расчетах для него использованы некоторые косвенные геолого-геофизические данные и итоги расчетов носят исключительно гипотетический характер. Все полученные результаты, включая карты, рассчитанные количественные параметры седиментации и интерпретацию, представлены в вышедшей в ноябре 2021 г. монографии автора [4]. Всего нашими исследованиями охвачено примерно 85% площади дна Мирового океана.

В докладе представлены данные по средневзвешенному литологическому составу (в $10^{18}$ г) нео-, эо- и в целом плейстоценовых отложений Тихого, Индийского, Атлантического и Мирового океанов. Сжатие результатов позволило получить представление о средневзвешенном литологическом составе также для основных осадкообразующих компонентов: литогенного вещества, $CaCO_3$ и биогенного опала. В итоге выяснилось, что за исключением Северного Ледовитого океана, в котором

в плейстоцене были развиты исключительно терригенные осадки, в остальных океанических бассейнах доминировало литогенное вещество, на втором месте находится $CaCO_3$ и совсем незначительную роль играет биогенный опал. Обращает на себя внимание феномен эоплейстоцена Атлантики, в котором карбонатов оказалось больше, чем литогенного вещества. С нашей точки зрения, этот феномен в большей степени объясняется не природными процессами, а недостатком существующих данных по бурению континентальных окраин данного океана. По вкладу различных океанов очевидно, что бóльшая часть литогенного вещества аккумулировалась в Тихом океане, а бóльшая часть биогенного материала (как карбонатов, так и биогенного опала) – в Атлантике.

По скоростям накопления сухого осадочного вещества (в $10^{18}$ г/млн лет) наблюдаются точно такие же тренды, как и для литологического состава. При этом выяснилось, что скорости накопления осадков в Мировом океане в настоящее время сильно уступают скоростям в эо- и, особенно, в неоплейстоцене.

Расчеты абсолютных масс (в г/см$^2$/тыс. лет) подтвердили вышеописанные тренды. Кроме того, установлено, что абсолютные массы (потоки) основных групп терригенных, вулканогенно-обломочных и карбонатных осадков росли в течение плейстоцена, а кремнистых – сильно варьировали от океана к океану, но в целом в Мировом океане почти не менялись. Во всех главных океанических бассейнах количественные параметры пелагических глин были выше в эоплейстоцене, чем в неоплейстоцене, что связано как с разбавлением иным по составу осадочным веществом, так и углублением в течение плейстоцена глубины карбонатной компенсации.

Наблюдаемые тренды в истории плейстоценовой океанской седиментации объясняются сочетанием ряда факторов: неотектонического горообразования на континентах, глобального посуровения климата и связанным с этим роста ледниковых щитов, тенденцией к понижению среднего уровня Мирового океана. Выявленные особенности истории плейстоценовой седиментации в Мировом океане являются закономерной частью глобальной истории геологического развития Земли в неоген-четвертичное время.

Таким образом, представленные результаты подтверждают мировой приоритет России и ГЕОХИ РАН в данном направлении наук о Земле.

1. *Ронов А.Б.* История осадконакопления и колебательных движений Европейской части СССР (по данным объемного метода*)*. Тр. Геофиз. ин-та АН СССР 3. 1949.136 с.

2. *Ронов А.Б., Хаин В.Е., Балуховский А.Н.* Атлас литолого-палеогеографических карт Мира. Мезозой и кайнозой континентов и океанов. Ленинград: ВСЕГЕИ, 1989. 79 с.

3. *Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G.* A Geologic Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 599 p.

4. *Левитан М.А.* Плейстоценовые отложения Мирового океана. М.: РАН, 2021. 408 с.

# ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОСАДОЧНЫХ И ОСАДОЧНО-ВУЛКАНОГЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

*Е.Ф. Летникова*

ФБГУН «Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН», *г. Новосибирск*
efletnik@igm.nsc.ru

На основе данных комплексного изучения современными геохимическими и изотопными методами осадочных и осадочно-вулканогенных последовательностей Сибирской платформы и отдельных тектонических блоков Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), проведена реконструкция геодинамических обстановок формирования осадочных толщ, определен их возраст и время формирования локализованных в них рудных проявлений и месторождений. Важным при этих исследованиях, является оценка масштаба влияния на состав осадков и рудных концентраций глобальных и локальных источников взвешенного и растворенного вещества, а также вулканизма и гидротермальных систем. Анализ геохимических и Nd-изотопных характеристик терригенных отложений, данные U-Pb-изотопного датирования детритовых цирконов и минерального состава (электронная микроскопия) позволят установить присутствие в обломочных породах продуктов разрушения субстратов различного возраста, состава и геодинамической природы, а также определить наличие или отсутствие синхронного с осадконакоплением вулканизма различной природы. Изучение изотопно-геохимических особенностей карбонатных отложений позволяет получить информацию о геодинамических обстановках седиментогенеза, источниках некарбонатного вещества этих осадков – терригенного или вулканогенного, а также гидротермального. В ряде случаев при отсутствии существенных нарушений Rb-Sr изотопной системы древних карбонатных пород возможно установить временной интервал карбонатонакопления на основе данных хемостратиграфии. Геохимические, Nd- и Sr-изотопные характеристики осадочных руд марганца, фосфора, бария, бокситов и их современных аналогов позволят расшифровать источники рудного вещества (ювенильные или коровые), а также проследить последовательность процессов рудогенеза. Геохимические, минералогические и изотопные (U-Pb и Lu-Hf ) исследования дали возможность установить новые, ранее неизвестные, импульсы щелочного и высококалиевого вулканизма в осадочных комплексах Сибирской платформы на рубежах – 960 (Туруханское поднятие), 640 (Бирюсинское Присаянье), 260 (Туруханское поднятие) и 235 (ниж. течение р. Лена) млн лет, отдельных террейнов ЦАСП на рубеже – 800 (Икатский террейн), 740 (Каратауский и Улутауский блоки Казахстана, Харальский блок Тувы), 500 (Агардагский блок Тувы), 455, 290 (оба Восточный Саян) млн лет.

К глобальным источникам поступления обломочного и взвешенного материала в бассейны седиментации Сибирской платформы относятся породы ее фундамента и более древнего осадочного чехла. Глинистые и терригенные породы древних крупных осадочных бассейнов наследуют редкоземельную специфику питающих провинций и отражают состав верхней части континентальной коры на определенных временных рубежах. Так, в результате проведенных нами изотопно-геохимических исследований рифейских и вендских терригенных отложений юга Сибирской платформы (хорбусуонская, оселковая, байкальская, тасеевская, вороговская серии и усть-тагульская, нижнетунгусикская свиты) четко прослеживается идентичность в распределении РЗЭ для изученных объектов

и стандарта (PASS), принятого за средний состав постархейской континентальной коры. Все это свидетельствует о том, что накопление этих отложений происходило в обширных осадочных бассейнах на шельфе Сибирской платформы, где протекало интенсивное перемешивание поступавшего обломочного материала, источники сноса которого длительное время оставались постоянными. Доказательством этого являются так же данные U-Pb датирования детритовых цирконов и полученные Sm-Nd модельные возраста. Ограничением при интерпретации геохимических и изотопных данных является рециклированная природа ряда изученных осадочных комплексов, для которых применения многих геохимических и изотопных подходов не имеет смысла, т.к. они в результате неоднократных процессов переотложения утратили генетическую связь с конкретными источниками поступления обломочного материала в бассейн седиментации.

На основе разработанных автором методических подходов геохимической диагностики карбонатных отложений различных палеогеодинамических обстановок, установлены глобальные источники поступления вещества в венд-кембрийские задуговые бассейны с активным карбонатонакоплением, которые образуют прерывистую полосу вдоль южного фланга Сибирской платформы и протягиваются более чем на 1000 км. Поступление растворенного и, в меньшей мере, взвешенного вещества, в данном случае, связано с процессами подводного выветривания и продуктами вулканической и гидротермальной деятельности, приуроченных к энсиматическим островным дугам. К локальным источникам поступления вещества можно отнести раннекембрийсикие мелководные карбонатные отложения палеосимаунтов, представленные породами хасуртинской и сорнинской свитами, Джидинской и Батеневской зон, соответственно. Накопление этих отложений происходило на вершинах вулканических островов, которые возвышались над океаническим дном на несколько километров. Влияние терригенной составляющей на состав осадков было минимальным. Напротив, в обстановках шельфов Сибирской платформы и микроконтинентов основным источником поступления материала при седиментации карбонатных пород являлся снос с суши. При этом, еще одним механизмом поступления вещества в осадочные бассейны шельфа является апвеллинга. Так, на основе изучение редких и редкоземельных элементов, Sm-Nd-изотопных данных показано, что накопление фосфоритов Тувино-Монгольского микроконтинента происходило в результате поступления глубинных обогащенных фосфором океанических вод в зону шельфа микроконтинента в результате глобальной циркуляции. При этом бокситы, приуроченные к нижней части чехла этого континентального блока имеют локальный источник, связанные с площадной корой выветривания этого микроконтинета.

На основе геохимических и Sm-Nd- и Sr-изотопных характеристик осадочных руд (марганцевые, фосфориты, бариты) реконструировано два типа подводных гидротерм в пределах северного сегмента ЦАСП. В первом случаи, они связаны с обширным венд-раннекембрийским гидротермальным полем Палеоазиатского океана, во втором, это короткоживущие поствулканические гидротермы задуговых бассейнов. Изучение продуктов древних кор выветривания (бокситов и шамозитов) геохимическими, изотопными и минералогическими методами позволили установить состав и возраст пород, по которым они развивались.

Проведенный анализ геохимического и изотопного состава кластики и растворенного вещества в осадочные бассейны Сибирской платформы и отдельных террейнов ЦАСП на границе протерозоя и фанерозоя позволяет оценить вклад разноранговых источников вещества различного генезиса и на основе этого проводить геодинамические реконструкции и прогнозировать потенциальную рудоносность разновозрастных осадочных бассейнов.

# ИЗОТОПНАЯ ГЕОХИМИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИТИИ

*Б.Г. Покровский*

ФГБУН «Российская академия наук», *г. Москва*
pokrov@ginras.ru

Цель доклада – охарактеризовать основные направления изотопной геохимии осадочных пород, используя, главным образом, примеры из работ лаборатории геохимии изотопов и геохронологии ГИН РАН.

Наиболее востребованным направлением является хемостратиграфия, основанная на изменении во времени изотопного состава элементов, содержащихся в океанической воде. Самая старая ветвь хемостратиграфии – изотопно-кислородная стратиграфия – стала разрабатываться более 50 лет назад. В настоящее время детальное стратиграфическое расчленение плиоцена и плейстоцена основывается на «Морских изотопных стадиях» (МИС) – циклических вариациях $\delta^{18}O$ в раковинах фораминифер из кернов глубоководных скважин. Не подвергается сомнению, что эти вариации отражают изменения температуры океанической воды и ее изотопного состава, связанного с накоплением и таянием ледников на континентах. В стратиграфии и палеоклиматологии позднего плейстоцена и голоцена часто используются озерные отложения. По изотопному составу кислорода в силикатных оболочках диатомовых водорослей оз. Байкал, который изучался нами совместно с сотрудниками ИГХ СО РАН (Иркутск), хорошо отбиваются границы последнего ледникового периода. Еще более детальную О-изотопную кривую удается получить по карбонатам из осадков оз. Тере-Холь (Тува), где выделяется голоценовый климатический оптимум (~5–7 тыс. лет назад), во время которого температура на Земле была существенно выше современной.

С увеличением возраста использование изотопного состава кислорода в хемостратиграфии затрудняется вследствие постседиментационных изменений. Вместе с тем, увеличивается значение Sr- и C- изотопной стратиграфии. Уже самая первая работа по изотопной геохимии верхнедокембрийских карбонатов западного склона Анабарского щита 1] выявила резкое расхождение между существующей схемой эволюции изотопного состава стронция в Мировом океане и полученными результатами. Причиной этого расхождения могла быть как ошибка в определении возраста отложений, так и неверная кривая эволюции $^{87}Sr/^{86}Sr$. В дальнейшем выяснилось, что верно и то и другое: в разрезе имеется незамеченный перерыв длительностью почти в миллиард лет, а эволюционная кривая $^{87}Sr/^{86}Sr$ основана на недостоверных данных: в настоящее время ее форма сильно изменилась. Еще одной ранней работой, продемонстрировавшей возможности C-изотопной стратиграфии, стала корреляция переходных толщ от докембрия к кембрию на севере и юге Сибирской платформы, которую не удавалось осуществить на основе биостратиграфии.

Исключительно широкими вариациями изотопного состава углерода выделяется венд (эдиакарий), лучшие карбонатные разрезы которого располагаются на юге Сибирской платформы и в Байкальской складчатой области. Эти разрезы изучаются нами уже более 20 лет. Результаты опубликованы в большой серии статей [2] и др., в которых рассмотрены проблемы геохронологии (методами C- и Sr- изотопной стратиграфии возраст некоторых свит патомского комплекса был скорректирован почти на 400 млн лет) и причины беспрецедентного в геологической истории «раскачивания» глобального углеродного цикла. Важнейшим хемостратиграфическим маркером венда является

уникальная по длительности и амплитуде отрицательная С-изотопная аномалия «Шурам-Вонока» (~580–560 млн лет), представленная в Сибири жуинской серией мощностью более 1 км. Нами обоснована гипотеза, согласно которой данное событие обусловлено глобальным потеплением и окислением метан-гидратов, накопленных в предшествующую, относительно холодную эпоху. Аналогичные события, хотя и существенно меньшей амплитуды, установлены в кайнозое (палеоцен-эоценовый термический максимум); весьма вероятно их развитие и в связи с современным глобальным потеплением.

В вендских отложениях изучались также «нетрадиционные» стабильные изотопы урана, молибдена, кальция, магния и др., вариации которых обычно обнаруживают связь с вариациями $\delta^{13}C$. В сибирских разрезах была установлена отрицательная корреляция изотопного состава углерода и магния [3], которая, по-видимому, является результатом изменения условий выветривания силикатных и карбонатных пород вследствие гляцоэвстатических трансгрессий и регрессий.

Наряду с позднедокембрийскими отложениями, в изотопной лаборатории ГИН РАН изучались разрезы раннего палеозоя. Наиболее интересным результатом этих исследований, опубликованных в серии статей, является выявление огромного изолированного палеобассейна, который занимал в среднем и верхнем кембрии около половины Сибирской платформы (верхоленская и эвенкийская серии). Изотопные исследования осадочных карбонатов широкого возрастного диапазона были проведены также на территории Белорусии [4]. Они позволили существенно скорректировать стратиграфию и выяснить условия осадконакопления в эпиконтинентальных морях запада Восточно-Европейской платформы. Для уточнения особенностей поведения изотопных систем в изолированных эвапоритовых бассейнах нами проведено изучение вод и осадков бассейнов, оставшихся после обмеления Аральского моря [5].

Постседиментационные смещения «первичных» изотопных отношений, осложняя хемостратиграфию, открывают возможность изучения миграции растворов и углеводородов в осадочных чехлах и могут быть использованы в нефте-газовой геологии. На Талаканском газо-конденсатном месторождении в Ю-З Якутии было обнаружено, в частности, что значения $\delta^{18}O$ в доломитах и $\delta^{34}S$ в ангидритах непродуктивной скважины заметно выше, чем в аналогичных породах продуктивных скважин [6]. Из этого следует, что сульфаты непродуктивной скважины претерпели частичное восстановление на стадии диагенеза, в результате чего коллектора стали менее проницаемыми и потеряли способность к катагенетическому порообразованию.

1. *Покровский Б.Г., Виноградов В.И.* Изотопный состав стронция, кислорода и углерода в верхнедокембрийских карбонатах Анабарского поднятия // ДАН. 1991. Т. 320. № 5. С. 1245–1250.

2. Покровский *Б. Г., Буякайте М. И., Колесникова А. А. и др.* С- О- и Sr-изотопная геохимия вендской аномалии Шурам-Вонока и ассоциирующих метаосадочных толщ внутренней части Патомского нагорья (Центральная Сибирь) // Литология и полезные ископаемые. 2021. № 5. С. 406–435.

3. *Pokrovsky B.G, Mavromatis V. and Pokrovsky O.S.* Co-variation of Mg and C isotopes in Late Precambrian carbonates of the Siberian Platform: a new tool for tracing the change in weathering regime? // Chemical Geology. 2011. V. 290. № 1. P. 67–74.

4. *Махнач А.А., Махнач Н.А. Покровский Б.Г.* Геохимия стабильных изотопов в платформенном чехле Беларуси / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. Минск: Беларуская навука. 2022. 373 с.

5. *Покровский Б.Г, Завьялов П.О, Буякайте М.И. и др.,* Геохимия изотопов O, H, C, S и Sr в водах и осадках Аральского бассейна // Геохимия. 2017. № 11. С. 1053–1066.

6. *Покровский Б.Г.* Следы миграции растворов и углеводородов в изотопном составе C, O и S коллекторов Талаканского газо-конденсатного месторождения, венд-кембрий юго-запада Сибирской платформы // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 3. С. 284–293.

# ГЕОХИМИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД ПРИ ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИЯХ

*М.И. Тучкова*

ФГБУН «Геологический институт РАН», г. Москва
tuchkova@ginras.ru

Геохимические методы исследования с применением высокопрецизионных технологий завоевало популярность и стало необходимым при комплексном изучении осадочных пород. Геохимические диаграммы незаменимы при изучении осадочных пород складчатых областей, которые из-за интенсивных деформаций и недостатка фаунистических данных сложно коррелировать между собой. Для палеореконструкций наиболее востребованы диаграммы, позволяющие определять геодинамические обстановки и состав источников сноса.

Осадконакопление на пассивной континентальной окраине рассмотрено на примере триасовых отложений арктической окраины Чукотки. Рутинные литологические исследования сопровождались геохимическими, которые включали в себя как изучение валовых составов осадочных пород, так и изучение состава отдельных минералов. Установлены: (1) общие этапы седиментации и постепенное смещение шельфовой зоны на юг в более глубоководные зоны; (2) крупный источник сноса, расположенный на севере, и представленный гранитно-метаморфическими комплексами, аналогичными по составу верхней континентальной коре; (3) возраст популяции обломочных зерен циркона указывает на размыв древнего мезо- и неопротерозойского фундамента и общего источника с возрастом 236 млн. лет.

Корреляция верхнетриасовых отложений Чукотки, о. Врангеля и образцов подводного опробования поднятия Менделеева (возраст молодой популяции зерен циркона 205–233 млн лет) на основании геохимических исследований позволила доказать их накопление в едином осадочном бассейне и отвечает заключительной стадии существования пассивной окраины Чукотского микроконтинента. Литолого-геохимические характеристики свидетельствуют о смене глубоководных фаций на Чукотке к более мелководным на о.Врангеля и прибрежно-морским в южной части поднятия Менделеева. Дополнительные литологические характеристики (петрографический состав песчаников и глин, состав минералов тяжелой фракции, строение разрезов) подтверждают сделанные выводы о едином осадочном бассейне в позднем триасе.

Триасовое время предшествовало крупным перестройкам в Восточной Арктике и началу формирования Амеразийского бассейна. Палеореконструкции этого времени важны для тестирования тектонических моделей Восточной Арктики. В последние годы критике подвергается наиболее популярная ротационная гипотеза образования Амеразийского бассейна, согласно которой микроплита Арктическая Аляска-Чукотка была оторвана от арктической Канады и причленилась к Азии в результате закрытия Протоарктического океана и коллизии в конце раннего мела [1, 2, 3]. Одним из критических критериев является тезис о сходстве триасового осадконакопления на Верхоянской и Чукотской пассивных окраинах [4, 5, 6 и др.]. Используя геохимические и литологические критерии, было доказано, что нельзя говорить об общих источниках сноса и единых интервалах осадконакопления для триасовых отложений Чукотской и Верхоянской пассивных окраин. Геохимические данные свидетельствуют о разном

составе фоновых отложений и песчаников, разном уровне выветривания в питающей провинции, что указывает на разный состав источников сноса.

Помимо выяснения особенностей осадконакопления, геодинамических обстановок и состава источников сноса, геохимические методы позволяют определить P-T условия формирования складчато-надвиговых деформаций по составу новообразованных минералов, вовлеченных в надвиги. Установлено, что наибольшее термобарическое воздействие на породы триаса оказал первый этап коллизионных деформаций. Кристаллизация наиболее крупночешуйчатых аутигенных слюд происходила в первый этап деформаций вдоль первого кливажа $S_1$. В зоне надвига температурный режим составляет (370–390 °C), самый высокий наблюдается в поднадвиговой зоне, наименьший – в принадвиговой.

Применение геохимических методов при изучении каменноугольных отложений Чукотки и о. Врангеля позволили не только коррелировать отложения карбона, расположенные в разных частях арктической окраины Чукотки, но и провести реконструкции осадконакопления в каменноугольное время, проследить этапы карбонатного осадконакопления в регионе, и оконтурить территорию развития каменноугольной карбонатной платформы. Установлен латеральный ряд палеоструктур от прибрежно-морских, мелководных шельфовых и отложений глубокого шельфа до океанических плато в Палео-Арктическом океане.

Геохимические исследования осадочных пород, также как датирование обломочных зерен циркона. необходимо проводить в комплексе с литологическими методами, чтобы повысить достоверность получаемых выводов.

1. *Embry A.F.* A tectonic origin for third-order depositional sequences in extensional basins – implications for basin modelling. In: Cross, T. (ed.) Quantitative Dynamic Stratigraphy. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, NJ: 1990. P. 491–502.

2. *Grantz A., May S.D., Hart P.E.* Geology of the Continental Margin of Alaska. // Geol. Soc. Amer., 1990. P. 257–288.

3. *Grantz A., Hart P.E., Childers V.A.* Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada basin, Arctic Ocean. From: Spencer, A.M., Embry, A.F., Gautier, D.L., Stoupakova, A.V. & Sørensen, K. (eds) Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs, 35. 2011. P. 771–799. doi: 10.1144/M35.50.

4. *Kuzmichev A.B.* Where does the South Anyui suture go in the New Siberian islands and Laptev Sea // Tectonophysics, 2009, v. 463, P. 86–108.

5. *Miller, E.L., Toro, J., Gehrels, G., Amato, J.M., Prokopiev, A, Tuchkova, M.I., Akinin, V.V., Dumitru, T.A., Moore, T.E., & Cecile, M.P.* New Insights into Arctic paleogeography and tectonics from U-Pb detrital zircon geochronology // Tectonics, 2006, 25, TC3013, doi: 10.1029/2005TC001830.

6. *Miller E.L., Akinin V.V.,Dumitru T.A., Gottlieb E., Grove M., Meisling K., Seward G.* Deformational history and thermochronology of Wrangel Island, East Siberian Shelf and coastal Chukotka, Arctic Russia // Geological Society, London, Spec. Publ., 2018. P. 460–482. doi http://dx.doi.org/10.1144/SP460.7

# ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦУНАМИ НА МОРСКИХ ПОБЕРЕЖЬЯХ РОССИИ

*В.К. Гусяков*

ФГБУН «Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН», *г. Новосибирск*
gvk@sscc.ru

Волны цунами, возникающие в морях и океанах при некоторых сильных подводных землетрясениях, вулканических извержениях, оползнях и обвалах, являются одним из наиболее опасных видов природных катастроф. В Российской Федерации угрозе цунами подвержено в первую очередь Курило-Камчатское побережье, а также побережья Японского, Охотского и Берингова морей. Исторический каталог цунами для Дальневосточного региона включает в себя 105 цунамигенных событий, происшедших там с 1737 года. Всего за этот период наблюдалось 10 разрушительных цунами с высотами на берегу 10 м и более, среди них было 2 мега-цунами с высотами более 20 м (в 1737 году и 1952 году), еще в 15 случаях цунами было опасным (высоты в диапазоне 2–10 м), в 13 случаях наблюденные высоты волн находились в пределах приливных колебаний (порядка 1–2 м), в остальных случаях цунами было слабым и наблюдалось только на приборных записях [1]. Таким образом, повторяемость разрушительных цунами у дальневосточных берегов РФ составляет в среднем один раз в 25 лет, опасных - один раз в 10–15 лет, слабые цунами наблюдаются практически ежегодно.

Цунамигенные события в историческое время происходили также на Черном, Каспийском, Балтийском, Баренцовом и Белом морях. Цунамиподобные явления известны на Байкале, на Ладоге, и даже на реках (таких как Волга и Днепр), вследствие крупных оползней и обвалов на их берегах. За прошедшие полвека ситуация с оценками цунамиопасности на этих побережьях кардинально поменялась, особенно за последнее десятилетие. Например, для Черного моря исторический каталог практически удвоился и сейчас он содержит 57 событий, среди которых были разрушительные цунами с высотами до 4–5 м, иногда до 7–8 м, вызывавшие гибельные последствия для древних городов и многих прибрежных поселений [2].

Двумя главными научно-практическими задачами, связанными с проблемой цунами являются **оперативный прогноз** и предварительное **цунамирайонирование побережья**. Оперативный прогноз осуществляется по факту возникновения сильного подводного землетрясения Службой предупреждения о цунами (СПЦ), действующей на Дальневосточном побережье РФ с 1958 года. Основная проблема такого прогноза связана с отсутствием прямой детерминированной связи между магнитудой подводного землетрясения и интенсивностью возникающих волн цунами. Как показано в [3], разброс интенсивности цунами относительно расчетных значений, полученных в [4], в диапазоне магнитуд 7.0–8.5, где происходит большинство цунамигенных землетрясений, достигает 6 баллов по шкале Соловьева-Имамуры, т.е. амплитуды волн могут различаться в 64 раза. Причины такого большого разброса проанализированы в работе [5]. Главной из них является вовлеченность оползневого механизма в процесс генерации цунами. Оказалось, что географическое распределение цунамигенных землетрясений с повышенной, нормальной и пониженной цунамиэффективность. («красных», «зеленых» и «синих» в терминологии работы [5]) тесно коррелирует с основными зонами океанического литогенеза, выделенными в фундаментальной работе А.П. Лисицына (1974) «Осадкообразование в океанах».

Важным результатом работы [6] явилось выделение предельно сильных транс-океанских цунами, возникающих при субдукционных землетрясениях магнитуды 9+ в отдельный класс цунамигенных событий. Эти мега-цунами характеризуются высокими заплесками (до 40–50 м), наблюдаемыми на протяженных участках побережья (до 500–1000 км). Период их повторяемости варьируется от 200–300 до 1000–1200 лет. Такие события составляют менее 1% от общего числа цунами Мирового океана, однако они ответственны за более чем 60% всех жертв цунами и вызывают 80% материального ущерба. Последнее такое событие (цунами Тохоку 11 марта 2011 года в Японии) привело к гибели более чем 18 тыс. человек (несмотря на своевременно выпущенный оперативный прогноз и высокую, в целом, готовность населения к такой опасности как цунами) и вызвало тяжелую аварию на атомной станции Фукушима [7].

Цунамирайонирование морского побережья – это получение и картирование вероятностных оценок ожидаемых высот цунами на побережье и их обеспеченности (повторяемости). В настоящее время такого рода оценки получаются на основе методики PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), являющейся аналогом методики PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), широко используемой во многих странах для расчета карт сейсмической опасности. В основе этой методики лежит построение вероятностной сейсмотектонической модели основных цунамигенных зон, угрожающих защищаемому побережью и применение численных моделей возбуждения и распространения цунами для расчета ожидаемых высот волн в конкретных пунктах побережья.

Пример расчета обзорных карт цунамиопасности Дальневосточного и Черноморского побережий России, рассчитанных по методике PTHA приведен в работе [8]. При этом для Дальневосточного региона в качестве зон расположения предельно сильных (магнитуды 9.0) землетрясений принималась вся Курило-Камчатская зона, в отличие, например, от карт сейсмической опасности территории РФ, рассчитанных по методике PSHA, где такого рода события допускаются только для Камчатки и северных Курил.

1. *Гусяков В.К.* Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика, 2016, № 9, С.1601–1615.

2. *Никонов А.А., Гусяков В.К., Флейфель Л.Д.* Новый каталог цунами в Черном и Азовском морях в приложении к оценке цунамиопасности российского побережья // Геология и геофизика, 2018, № 2, С. 238–253.

3. *Gusiakov V.K.* Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // Pure and App. Geoph. 2011, V.168, Issue 11, P.2033–2041.

4. *Гусяков В.К., Чубаров Л.Б.* Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Физика Земли. 1987. № 11, С.53–64.

5. *Gusiakov V.K.* "Red", "green" and "blue" Pacific tsunamigenic earthquakes and their relation with conditions of oceanic sedimentation // Tsunamis at the End of a Critical Decade. G.Hebenstreit (Editor), Kluwer Academic Publishers, 2001, P.17–32.

6. *Гусяков В.К.* Сильнейшие цунами мирового океана и проблема безопасности морских побережий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2014, Т.90, №5, С.496–507.

7. *Nöggerath J., Geller R. J., Gusiakov V.K.* Fukushima: The myth of safety, reality of geoscience // Bulletin of the Atomic Scientists, 2011, 67(5), 37–46.

8. *Шокин Ю.И., Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б.* Методика построения карт цунамиопасности и ее реализация для Дальневосточного побережья Российской Федерации // ДАН, 2019, Т.489, №4, С.419–425.

# МНОГОМАСШТАБНЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

*А.Ф. Еманов*

Алтае-Саянский филиал ФГБУН ФИЦ
«Единая геофизическая служба РАН», *г. Новосибирск*
emanov@gs.nsc.ru

На основе развития сейсмологических работ в Алтае-Саянской горной области с сочетанием: региональной сети станций; с сейсмологическими полигонами; экспериментами с десятками временных станций для изучения афтершоковых процессов, мест предполагаемых сейсмических активизаций и районов размещения особо важных объектов; инженерно-сейсмологических исследований зданий и сооружений и выполнения мониторинговых работ; вибросейсмического мониторинга. Были разработаны [2, 4, 5] новые методы цифровой обработки сейсмических данных, которые в сочетании с современными методами других авторов позволили получить принципиально новые фундаментальные, а также практически значимые результаты. Алгоритмы цифровой обработки сигналов создавались на двух принципиально отличающихся моделях волновых полей.

Во-первых, использовалась модель свёртки единичного сигнала с импульсной характеристикой среды с добавлением случайного шума, во-вторых, модель суммы когерентного сигнала с помехами, куда входят случайные шумы и некогерентные волны. Расширено понятие когерентности: когерентность во времени – стоячие волны; когерентность по одному измерению пространства – головные волны; когерентность по множеству реализаций – вибрационные сигналы и волновые поля от короткозамедленных промышленных взрывов; когерентность по лучу – кратные отражённые волны; когерентность по площади – опорные волны в волновых полях короткозамедленных взрывов [4, 5].

На основе модели суммы когерентных и некогерентных волн создан единый подход, модифицируемый для выделения в чистом виде когерентных волн разных типов и построения на этом новых методов сейсмических исследований. На основе выделения когерентных сигналов разработаны и научно обоснованы алгоритмы заложенные в основе: метода стоячих волн для исследования зданий и сооружений и исследования резонансных свойств слоистых сред; методов приёма вибрационных сигналов на фоне сильных нестационарных шумов при сейсмическом мониторинге земной коры и исследовании земной коры на опорных геофизических профилях; динамического пересчёта преломленных волн для сейсмических исследований с плотными системами источник-приёмник и др.

На основе региональной сети станций определены основные закономерности развития фоновой сейсмичности в Алтае-Саянской горной области [3], а именно изучена самоорганизация сейсмичности вокруг впадин и установлена иерархия по скорости развития сейсмичности структур региона, а также изучены общие и индивидуальные черты афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области. На основе детальных исследований в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения [6, 7], 2003 г, Ms=7.3 получены фундаментальные данные о сейсмической активности эпицентральной зоны за два десятилетия. Получена объёмная структура активизированных разломов, в которой присутствуют горизонтальные сейсмически активизированные слои, а также установлена неравномерность изменения плотности очагов вдоль магистрального сдвигового разлома и изменчивость структуры, связанная

с блоковым строением, выявлены участки оперений и разветвлений активизированных разломов. Доказана иерархия напряжённого состояния эпицентральной области, когда по крупным афтершокам единый тип напряжённого состояния, а для событий малых энергий разнообразный, увязанный с боковым строением. Установлен факт эволюции сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. в период до 2022 года. С запаздыванием на десятилетие изменилась сейсмичность смежных геологических структур на удалениях до 80 км и активизировались некоторые структуры на круге с радиусом 250–300 км.

Детальные сейсмологические исследования в Кузбассе — это исследования закономерностей возникновения и протекания наведённой сейсмичности, вызванной добычей полезных ископаемых [1]. Сейсмические активизации подземных выработок проявляются как облака сейсмичности на глубинах до 1.5 км от ложа выработки и смещаются в пространстве вместе с забоем. Основным триггером является вибрация от работы комбайнов. Сейсмические активизации открытых выработок охватывают глубины до 4–5 км под разрезом или отвалом. Крупнейшее событие – Бачатское землетрясение, 2013 г, ML=6.1.

На основе сейсмологических исследований уточнены зоны ВОЗ, определены для каждой наклоны графика повторяемости, построена региональная зависимость затухания колебаний и выполнены расчёты карт детального сейсмического районирования. Развито микросейсмическое районирование с построением карт резонансов геосреды на собственных частотах. Осуществлено развитие метода стоячих волн [4] до уровня корректировки расчётных моделей зданий по десяткам собственных колебаний горизонтальных, крутильных и вертикальных. Идёт работа по созданию совместной сети мониторинга землетрясений и особо опасных инженерных сооружений. Исследования глубинного строения земной коры по данным сейсмических исследований ориентированы на улучшение скоростных моделей для повышения точности данных сейсмологии.

1. *Emanov A.A., Emanov A.F., Rebetsky Y.L., Kuprish O.V., Fateev A.V., Shevkunova E.V.* Indused Seismicity of the Bachat Coal Mine and the Stress State of the Earth's Crust // Journal of Volcanology and Seismology, 2021, Vol. 15, No. 6, pp. 435–444.

2. *Еманов А.Ф.* О применении вибраторов для определения сейсмостойкости зданий и в микросейсморайонировании // Геология и геофизика № 7, 1995, 87–92 с.

3. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д.* Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика. том 9, № 1, январь – февраль 2006, С. 33–43.

4. *Еманов А.Ф., Красников А.А.* Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий.// Вопросы инженерной сейсмологии . 2015. Т.42, №4. С. 37–64.

5. *Еманов А.Ф., Полянский П.О., Сальников А.С.* Сейсмическая модель верхней части земной коры юго-восточной границы Сибирской платформы. / Физика Земли, 2021, № 3, С. 130–146 с.

6. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.* Сейсмотектоника активизированной объёмной структуры разломов: результаты исследования строения верхнекоровой очаговой области Чуйского землетрясения *Ms* = 7.3, произошедшего 27 сентября 2003 г. в Горном Алтае (Россия) // Геотектоника. 2021. № 2.–94–104 с.

7. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.* Устойчивые структуры афтершоков Чуйского землетрясения 2003 года. // Геология и геофизика. 2022, № 1, С. 87–101.

# ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ СИБИРИ И АРКТИКИ, РЕГИОНАЛЬНЫЕ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРИОРИТЕТЫ

*Д.В. Метелкин*

ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», *г. Новосибирск*
metelkindv@g.nsu.ru

О палеомагнетизме, как явлении записи в горных породах характеристик древнего магнитного поля Земли, известно давно. Но качественный скачок в его систематическом изучении связан с 1960–1970 гг, когда в тектонике на смену учению о геосинклиналях пришла новая глобальная концепция – теория литосферных плит. Возможность количественных оценок палеогеографического положения, направленности и масштабов горизонтальных перемещений блоков земной коры, позволяющие уменьшить многовариантность традиционных геологических моделей, сделали палеомагнитный метод одним из самых эффективных инструментов реконструкции тектонической эволюции континентов и океанов [1]. Тем не менее, сегодня в России лишь несколько исследовательских научных центров и лабораторий, оснащенность которых не уступает мировым стандартам в этой области геофизики. Среди них Новосибирский центр, который активно работает над палеотектоническим моделированием Сибири и Российской Арктики. Степень изученности этих территорий заметно ниже, а в труднодоступных районах, например, на островных поднятиях северных архипелагов Анжу, Де-Лонга, Северная Земля, вообще представляла белое пятно.

Палеотектонические модели любого масштаба критически зависят от обоснования географического положения, кинематики дрейфа наиболее крупных элементов континентальной коры – кратонов. Наибольшим провалом для Сибири являлся неопротерозойский и, частично, мезозойский интервалы геологического времени. Главным итогом более чем 30-летней работы по расшифровке палеомагнитной записи в осадочных и магматических комплексах этого возраста на юго-западе, севере Сибири, в структурах складчатого обрамления стали авторский вариант траектории кажущегося движения полюса для последнего миллиарда лет и оригинальная тектоническая концепция, в основе которой определяющая роль сдвиговых перемещений на всех этапах эволюции Сибирского палеоконтинента и смежных океанов [2].

Так, на количественной основе удалось не только обосновать положение Сибирского кратона в структуре Родинии, разрешив тем самым принципиальные геологические споры, но и вполне однозначно описать механизм распада суперконтинента, заложение неопротерозойских океанических бассейнов, в том числе Палеоазиатского, на фоне разнонаправленного вращения главных составных элементов, т.е. при существенно трансформном режиме формирования континентальных окраин [3].

Обнаруженные закономерности палеомагнитной записи также позволили доказать, что венд-кембрийские субдукционные комплексы Алтае-Саяно-Байкальской области представляли фрагменты единой протяженной системы, расположенной вдоль западной окраины Сибирского кратона. Трансформация ее архитектуры на аккреционном этапе, в ордовике обусловлена наличием сдвиговых зон левосторонней кинематики, возникших в результате косой субдукции и вращения континентальной плиты по часовой стрелке, также доказана ошибочность представлений об Амурском составном континенте в структуре Монголо-Охотского пояса и многое другое [4, 5].

Новые палеомагнитные данные по мезозою Сибири стали серьезным аргументом в обосновании реалистичности и характера внутриплитных сдвигов между основными тектоническими элементами композитной структуры Евразийской плиты, традиционно считавшейся абсолютно жесткой в мезозое-кайнозое. Они также проясняют ряд региональных тектонических аспектов: время, продолжительность, условия траппового магматизма; механизм формирования грабен-рифтовых структур Забайкалья; режим закрытия Монголо-Охотского океана и прочее, задавая, таким образом, существенные ограничения многим региональным палеотектоническим моделям [6].

Другим приоритетным объектом палеомагнитных исследований является Арктика. Расшифровка структуры, тектонической истории арктического шельфа имеют не только фундаментальный научный интерес, но и очевидное геополитическое значение.

В том числе, удалось впервые с использованием количественной фактической основы, обосновать строение и разработать модель эволюции древнего континента Арктида, выявить механизмы формирования структуры шельфа, закономерности плюмового магматизма и его геодинамическую связь с раскрытием котловин Северного Ледовитого океана [7, 8]. Среди прочего, реконструирована палеогеография островных поднятий архипелага Новосибирские острова, его акватории, включая подводный хребет Менделеева, террейнов Колымо-Омолонской и Чукотско-Аляскинской областей, обоснован преобладающий сдвиговый тектонический режим в эволюции этого фрагмента Арктиды [9]. Доказана прямая связь раннемелового траппового магматизма на архипелаге Земля Франца-Иосифа с эволюцией Исландской горячей точки, что подтверждает идеи о длительной стационарности плюмовых источников [10].

Таким образом, благодаря палеомагнитным данным, геологические модели Сибири и Арктики переходят из разряда субъективных к количественно обоснованным и все более точным. Развитие самого подхода позволяет говорить о его состоятельности, как нового научного направления – магнитотектоники, со своей методической основой, непосредственными объектами и областью приложения результатов.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 21-17-00052).

1. *Метелкин Д.В.* Эволюция структур Центральной Азии и роль сдвиговой тектоники по палеомагнитным данным. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2012, 460 с.

2. *Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю.* Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции // Геология и геофизика, 2012, 53(7), С. 883–899.

3. *Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю.* Неопротерозойский этап эволюции Родинии в свете новых палеомагнитных данных по Сибирскому кратону // Геология и геофизика, 2007, 48(1), С. 42–59.

4. *Метелкин Д.В.* Кинематическая реконструкция раннекаледонской аккреции на юго-западе Сибирского палеоконтинента по результатам анализа палеомагнитных данных // Геология и геофизика, 2013, 54(4), С. 500–522.

5. *Gordienko I.V, Metelkin D.V. et al.* New palaeomagnetic data from Argun terrane. Testing its association with Amuria and the Mongol-Okhotsk Ocean // Geophysical Journal International, 2018, 213, 1463–1477.

6. *Metelkin D.V., Vernikovsky V.A. et al.* Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence // Gondwana Research, 2010, 18(2–3), 400–419.

7. *Metelkin D.V., Vernikovsky V.A., Matushkin N.Yu.* Arctida between Rodinia and Pangea // Precambrian Research, 2015, v.259, p.114–129.

8. *Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В. и др.* Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика, 2013, 54(8), С. 1083–1107.

9. *Metelkin D.V., Vernikovsky V.A. et al.* First paleomagnetic data for the New Siberian Islands: Implications for Arctic paleogeography // Gondwana Research, 2016, 37, 308–323.

10. *Метелкин Д.В., Абашев В.В. и др.* Палеомагнитное обоснование стационарности Исландского плюма и его раннемелового проявления в Высокоширотной Арктике // Доклады РАН. Науки о Земле, 2021, 501(2), С. 139–144.

# СЕЙСМОЛОГИЯ – НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

*В.С. Селезнев*

ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», *г. Новосибирск*
svs0428@mail.ru

К 1995 году, когда была организована ГС СО РАН, финансирование сейсмологических экспедиций сократилось в 23 раза по сравнению с доперестроечным периодом. Чтобы не остановить сейсмологические исследования в Сибири, была предпринята попытка создать новые, востребованные рынком технологии. Учитывая имеющейся у ГС СО РАН задел, были начаты работы ГСЗ, с использованием мощных вибраторов, и речные сейсморазведочные работы. Кроме новых результатов о строении земной коры Сибири (профили ГСЗ около 5000 км и речные профили – 3800 км), работы стали приносить деньги на развитие сейсмологических наблюдений [1, 2]. Уже через 8 лет сеть сейсмологических наблюдений в Сибири стала цифровой, и было организовано три обрабатывающих центра – в Якутске, Иркутске и Новосибирске. В Японии, Европе, Америке уже стояли тысячи станций, в Сибири – 100. Основная проблема в том, что по информации, полученной на такой сети наблюдений, невозможно получать детальные данные о строении Земли и строить точную карту сейсмического районирования.

Чтобы изучать малые землетрясения, нами была избрана тактика установки временных станций на отдельных участках и регистрация землетрясений при проведении сейсмических работ, когда станции стояли по профилям практически непрерывно. Таким образом, были детально изучены волновые поля от землетрясений на Байкале. На временных сетях изучалось Чуйское землетрясение 2003 года и техногенная сейсмичность в Кузбассе. Так как времена в очаге на редких системах наблюдения определяются с большой ошибкой, были разработаны и внедрены в практику способы интерпретации данных преломленных и отраженных P- и S- волн, полученных по площади, в рамках изотропных и анизотропных моделей среды от землетрясений, основанные на использовании кажущихся скоростей, которые в сейсмологии определяются очень точно по разности времён прихода волн [3]. Получены новые данные о строении земной коры и верхов мантии во многих районах Сибири.

Также востребованными оказались работы с использованием технологии, изучения физического состояния зданий и сооружений [4]. К настоящему времени, с использованием этой технологии, обследовано большинство сибирских плотин ГЭС, сотни зданий, десятки мостов. Мы видели, что в зданиях, в которых мы находимся, регистрируется большое количество различных монохроматических колебаний. Человек и его органы также обладают собственными частотами. В ситуации, когда эти частоты совпадают, возникают резонансные колебания, которые могут менять физическое состояние человека. Причем два человека, находящиеся в одном здании, будут реагировать на внешние колебания по-разному. Это и есть основы сейсмоэкологии.

Выделяя очень слабые сигналы от вибраторов на больших расстояниях, мы поняли, что основная информация на сейсмограммах содержится не в записях землетрясений, а в сейсмическом фоне. Изучая его спектральный состав, мы можем решать широкий класс задач. При звучании оркестра, мы отличаем саксофон от барабана, не используя времена прихода сейсмических волн, определяем момент, когда порвалась струна на скрипке [5]. Также существует и принципиальная возможность контроля физического

состояния зданий, сооружений и работающего оборудования. В этом случае, мы от сейсмограммы переходим к ее спектру и изучаем, как спектры меняются во времени.

Впервые мы стали применять такой подход, изучая аварию на Саяно-Шушенской ГЭС. Выполнив 15 договоров за 5 лет, мы научились «слушать» и расшифровывать записи от работающей станции так же, как музыкант понимает – кто и как играет в оркестре. А запись аварии была зафиксирована сейсмостанцией, находящейся в 4 км. Это позволило определить причины аварии, анализируя только сейсмические данные [6]. Создан специальный комплекс, позволяющий с хорошим динамическим диапазоном регистрировать сейсмические колебания и передавать информацию в обрабатывающий центр. Далее, используя программное обеспечение «SpeectrumSeis», мы проводим расшифровку получаемой информации. Было запатентовано более 10 различных способов обработки сейсмических сигналов, которые легли в основу создаваемых технологий контроля зданий, сооружений и работающего оборудования. Все они опираются на зарегистрированные сейсмологические записи, а они на нашем сервере хранятся за многолетний период. Таким образом, нам удалось проследить за изменениями собственных частот СШ ГЭС и Черкейской ГЭС за десятилетия и организовать очень дешёвый мониторинг физического состояния плотин.

А может ли человек не только следить, но и управлять сейсмическим процессом? При изучении техногенных процессов на шахтах, мы заметили, что если работы останавливаются, то и количество землетрясений резко сокращается. Далее мы провели эксперимент с вибратором, измеряя выделенную энергию микросейсм во времени в различных полосах частот, и определили, что, после включения вибратора, среда начинает излучать сейсмические колебания сильнее. Затем выяснили, строя графики повторяемости за 40 лет, что вблизи железной дороги, проходящей вдоль Байкала, больших землетрясений происходит меньше, а маленьких больше, по сравнению с областью вдали от дороги. В Кузбассе, там, где ведутся взрывные работы и работают шахты, землетрясений с малой энергией также стало происходить больше, а с большой магнитудой меньше [**7**]. Так мы доказали возможность изменения характеристик протекания естественного сейсмического процесса, путем воздействия на среду сильными вибрационными нагрузками.

1. Особенности глубинного скоростного строения Забайкальского участка Центрально-Азиатского складчатого пояса по данным сейсмологии и ГСЗ (в створе опорного профиля 1-СБ). / *Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Чечельницкий В.В., Лисейкин А.В., Галева Н.А.* // Тихоокеанская Геология. Х., 2020. Т. 39. № 5. С. 56–68.

2. Методика изучения строения земной коры на всю мощность средствами речной сейсморазведки. / *Лисейкин А.В., Соловьев В.М., Брыксин А.А., Селезнев В.С.* // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. М., 2022. Т. 502. №2. С. 101–106.

3. Wave fields from powerful vibrators in active seismology and depth seismic researches / *Seleznev V.S., Solovyev V.M., Liseikin A.V., Emanov A.F., Yushin V.I., Kashun V.N.* // Active Geophysical Monitoring (Second Edition). Editor(s): Junzo Kasahara, Michael S. Zhdanov, Hitoshi Mikada Elsevier, 2019. Chapter 5.4. Pages 389–404.

4. Патент № 2140625 Российская Федерация. Способ определения физического состояния зданий и сооружений: зарегистрирован 27 октября 1999 года: Бюл. № 30 от 27.10.99 / *Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П.*

5. *Селезнев В.С.* Симфония катастроф / В.С. Селезнев // Наука из первых рук. – Новосибирск, 2010. №4. С. 35–37.

6. *Seleznev V.S., Kurzin V.B.* Mechanism of emergence of intense vibrations of turbines on the Sayano-Shushensk hydro power plant. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. Издательство: Pleiades Publishing, Ltd. (Плеадес Паблишинг, Лтд) (Род-Таун), 2010. Т. 51. № 4. С. 590–597.

7. *Селезнев В.С., Брыксин А.А.* Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика. Новосибирск, 2012. Т. 53. № 3. С. 399—405.

# СПУТНИКОВАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ БЛОКОВО-РАЗЛОМНОЙ СТРУКТУРЫ, КРИОГЕННЫХ И ОПОЛЗНЕВЫХ ЯВЛЕНИЙ

*Т.Н. Чимитдоржиев*

ФГБУН «Институт физического материаловедения СО РАН», *г. Улан-Удэ*
tchimit@ipms.bscnet.ru

В докладе представлены следующие результаты [1–10]:

– метод оценки косейсмической геодинамики блоково-разломной структуры, позволяющий выделить подвижные геоблоки по данным спутниковой радиолокационной дифференциальной интерферометрии L-диапазона и установить временные тренды деформаций этих гео-блоков при помощи метода интерферометрии постоянных рассеивателей по данным С-диапазона длин волн бесснежного периода времени;

– метод многопараметрического спутникового радиолокационного контроля активации/реактивации и оценки последствий оползневых явлений на основе анализа величин обратного радарного рассеяния, интерферометрической фазы и изменения физических механизмов радиолокационного поляриметрического рассеяния;

– дистанционная оценка глубины снежного покрова и водного эквивалента снега на основе измерения интерферометрической фазы космического радиолокатора;

– метод оценки пространственной анизотропии неоднородных природных сред на примере неоднородностей леса («приоритетные результаты, полученные в области физики в 2019 году»);

– измерения деформаций поверхности над шахтами Кузнецкого угольного бассейна.

– оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования.

1. Earth surface subsidence in the Kuznetsk coal basin caused by manmade and natural seismic activity according to ALOS PALSAR interferometry. Zakharov A.I., Epov M.I., Mironov V.L., Chymitdorzhiev T.N., Bykov M.E., Seleznev V.S., Emanov A.F., Cherepenin V.A. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. v. 6. № 3. pp. 1578–1583.

2. Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования. Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И., Быков М.Е., Дмитриев А.В., Балданов Н.Д., Мухорин Е.А., Мильхеев Е.Ю. Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 1. С. 80–87.

3. Исследование оползневых процессов и деформаций ландшафта полуострова Ямал методами радарной интерферометрии и текстурного анализа. Чимитдоржиев Т.Н., Кирбижекова И.И., Быков М.Е. Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 610–614.

4. Comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal Lake region, Russia. Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N., Bykov M.E., Dmitriev A.V., Kirbizhekova I.I. Journal of Applied Remote Sensing. 2016. v. 10 (1), 016006.

5. Методы радарной поляриметрии для исследования изменений механизмов обратного рассеяния в зонах оползней на примере обрушения склона берега реки Бурея. Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н., Захаров А.И., Захарова Л.Н. Исследование Земли из космоса. 2019. № 4. С. 3–17.

6. Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического зондирования / В.Г. Бондур, Т.Н. Чимитдоржиев, А.В. Дмитриев, П.Н. Дагуров // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 92-103. DOI 10.31857/S0205-96142019392-103.

7. Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment. Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I. International Journal of Remote Sensing. 2020. Т. 41. № 24. С. 9328–9359.

8. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии. Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 144–150.

9. Fusion of SAR interferometry and polarimetry methods for landslide reactivation study, the Bureya river (Russia) event case study. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Dmitriev A., Dagurov P. Remote Sensing. 2021. Т. 13. № 24. С. 5136.

10. Оценка реактивации оползня на реке Бурея методами радарной интерферометрии. Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 83–89.

# «ВУЛКАНОЛОГИЯ, СЕЙСМОЛОГИЯ; ГОРНЫЕ НАУКИ, ГЕОЭКОЛОГИЯ»

## ГЕОТЕРМОФЛЮИДОМЕХАНИКА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.В. Кирюхин*

ФГБУН «Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН»
*г. Петропавловск-Камчатский*
AVKiryukhin2@mail.ru

**Введение**. Научные исследования вулканов, гейзеров, горячих источников и землетрясений на Камчатке начались в 1737 г с описаний С.П. Крашенинникова. Систематические наблюдения за вулканами инициированы в 1935 г на Ключевской вулканостанции, в 1937 г Б.И. Пийп издал книгу «Термальные Ключи Камчатки», в 1941 г. Т.И. Устиновой открыта Долина гейзеров. В 1962 г с созданием Института вулканологии СО СССР научные исследования приобрели фундаментальный характер. В.В. Аверьев сформировал школу гидрогеологов-геотермиков (В.М. Сугробов, Е.А. Вакин и многие другие), подготовивших пуск Паужетской ГеоЭС в 1966 г. Деятельность С.А. Федотова с 1971 по 2003 г положила начало созданию сети инструментальных сейсмологических наблюдений, Совета по прогнозу землетрясений и извержений вулканов (1979), им же предложена теория формирования магматических питающих систем вулканов (2004). В 1996 г А.В. Кирюхиным опубликована работа [2], инициировавшая пуск Мутновской ГеоЭС 50 МВт в 2002 г. В 2003 г Е.И. Гордеев объединил исследования в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, что позволило наиболее эффективно использовать сейсмологические данные для выяснения механизма магматической деятельности вулканов, условий формирования прилегающих к ним гидротермальных систем, продолжить разработку теории для прогноза сильнейших землетрясений.

**Постановка задачи**. Геотермофлюидомеханика объединяет задачи тепломассопереноса и геомеханики. Развитие теоретических основ и использование эффективных вычислительных инструментов геотермофлюидомеханики для описания природных и геотехнологических процессов необходимы в связи с решением фундаментальных проблем наук о Земле. Среди этих проблем выделяются следующие: 1) описание и прогноз функционирования вулканов и прилегающих к ним гидротермальных систем; 2) формирование естественных и искусственных циркуляционных систем в виде продуктивных гидротермальных, нефтяных и газовых резервуаров с использованием термолифта, гидроразрыва и химического преобразования вмещающих горных пород; 3) выяснение условий генерации сильнейших землетрясений и их прогноз.

**Основные полученные автором результаты**:

(1) Показано, что активные вулканы являются инжекторами воды и магмы в прилегающие геофлюидные резервуары, формируют высокотемпературные (>150$^{o}$) гидротермальные системы [1, 5, 10, 12]. Разработаны методы диагностики продуктивных геотермальных резервуаров и оценки их эксплуатационных запасов [2, 4, 9].

(2) Установлено, что гейзеры являются результатом циклического $CO_2$-газлифта в районах активного кислого вулканизма [8, 11, 12]. Динамика притока глубинного теплоносителя и гидротермальные преобразования минерального состава являются триггерами катастрофических геологических процессов [3, 6, 13].

(3) Потухшие вулканы обеспечивают водное питание и формирование средне- и низкотемпературных гидротермальных систем (<150$^o$) [9, 12].

(4) Предложен метод использования сейсмологических данных для определения геометрии магматических инжекций и геомеханических условий под активными вулканами [7, 12].

(5) Показано, что резервуары, сформированные в результате магматического фракинга являются потенциально продуктивными геофлюидными резервуарами [10, 12].

(6) Установлено, что сейсмогенные разломы на шельфе Камчатки являются индикаторами генерации флюидов в режиме гидроразрыва до глубин 250 км [12].

**Задачи дальнейших исследований**.

(1) 3D-описание магматической активности действующих вулканов по сейсмическим, петрологическим, геодезическим и гидрогеологическим данным с целью прогноза вулканических извержений, гидротермальной деятельности и сильнейших землетрясений.

(2) Разработка рекомендаций по использованию геотермальных месторождений для полного тепло-электрообеспечения и рекреационно-бальнеологических потребностей Камчатки и Курильских островов.

(3) Применение методов геотермофлюидомеханики для выяснения условий формирования продуктивных геофлюидных (вода, пар, нефть, газ, руда) сложно-построенных резервуаров с целью повышения эффективности их разведки и эксплуатации.

(4) Геофлюидомеханический анализ сейсмогенных разломов зоны субдукции в связи с прогнозом сильнейших землетрясений.

1. *Кирюхин А.В., Сугробов В.М.* Модели теплопереноса в гидротермальных системах Камчатки, М. Наука 1987, 149 с.

2. *Kiryukhin A.V.* Modeling Studies: Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // Geothermics, Vol.26, No.1 ,1996, p.63–90.

3. *Kiryukhin A.V., Xu T., Pruess K., Apps J., Slovtsov I.* Thermal-Hydrodynamic-Chemical (THC) Modeling Based on Geothermal Field Data //Geothermics, Vol.33, No.2, 2004, p. 349–381.

4. *Kiryukhin A.V., Asaulova N.P., Finsterle S.* Inverse modeling and forecasting for the exploitation of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia, Geothermics, V. 37, p. 540–562, 2008.

5. *Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов // С. Петербург, Наука, 2010, 395 с.

6. *Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K.* Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // Applied Geochemistry 27 (2012) 1753–1766.

7. *Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология, 2016, Т. 5, С.1–18.

8. *Kiryukhin A.* Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 323, p. 129-147, 2016.

9. *Kiryukhin A.V., Vorozheikina L.A., Voronin P.O., Kiryukhin P.A.* Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia // Geothermics 70 (2017) 47–61.

10. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A.* Thermal-Permeability Structure and Recharge Conditions of the Mutnovsky High Temperature Geothermal Field (Kamchatka, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research 356C (2018) pp. 36–55.

11. Kiryukhin A., Sugrobov V., Sonnenthal. E. Geysers Valley CO2 Cycling Geological Engine (Kamchatka, Russia). Geofluids Journal. 2018. Article ID 1963618

12. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем// Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.

13. *Kiryukhin, A.V., Polyakov, A.Y., Zhuravlev, N.B., Tsuchiya, N., Rychkova, T.V., Usacheva, O.O., Dubrovskaya, I.K.*, 2022. Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geyser eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka. Applied Geochemistry. 136, Article ID 105166.

# ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗВЕРЖЕНИЙ НАДСУБДУКЦИОННЫХ БАЗАЛЬТ-АНДЕЗИБАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ

*А.Ю. Озеров*

ФГБУ «Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН»
*г. Петропавловск-Камчатский*
ozerov@ozerov.ru

Создана обобщенная генетическая модель функционирования базальтовых-андезибазальтовых вулканов.

В качестве главного объекта исследования выбран вулкан Ключевской, для которого характерны все типы базальтовых-андезибазальтовых извержений. Вулкан извергается практически ежегодно.

Работы проводились по следующим основным направлениям: геологическому, петролого-геохимическому, вулканологическому, геофизическому, газогидродинамическому. Кроме того, выполнено конструирование приборов, физическое моделирование и синтез составляющих частей модели.

Для решения поставленных задач автором разработаны три оригинальные методики: в сейсмологии – анализа вулканического дрожания (эквидистантный поинтервальный отсчет), в петрологии – парного изучения составов твердофазных микровключений в минерале-хозяине, и в физике – газогидродинамического моделирования вертикальных питающих магматических систем. Спроектирована и изготовлена экспериментальная аппаратура нового поколения – установка физического моделирования динамики извержений (высота 18 метров). Установка позволяет моделировать процессы, происходящие в питающих системах вулканов, и не имеет аналогов в мире.

Результаты, полученные автором к настоящему времени.

МЕХАНИЗМ ЭВОЛЮЦИИ МАГМ. Создана петролого-геохимическая модель формирования известково-щелочной непрерывной высокомагнезиальной-высокоглиноземистой базальт-андезибазальтовой серии пород Ключевского вулкана. Показано, что магматическая серия (MgO от 12 до 4 %) сформировалась из исходных высокомагнезиальных базальтов в результате декомпрессионного фракционирования (Ol, Cpx) и повторяющихся в магмоводе актов автосмешения, во время которых происходит химическое смешение расплавов и физическое смешение минеральных фаз (рис.). Разнообразие пород серии определяется глубиной, на которой от основного магмовода отделяется расплав, транспортируемый дайками на склоны вулкана.

ПЕРИОДИЧНОСТИ В ДИНАМИКЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ. Выявлено новое свойство базальтового-андезибазальтового вулканизма – устойчивые периодичности в динамике извержений, проявляющиеся в широком временном диапазоне (секунды–сутки). Установлены три основные группы периодичностей: пульсирующее фонтанирование – 0,66–5 с; стромболианские взрывы – 20 с – 20 мин и периодическое фонтанирование – 1,5–8 ч (рис.). Пульсирующее фонтанирование и периодическое фонтанирование, впервые выделенные на Ключевском вулкане типы базальтовых извержений, в последующем установлены на других вулканах мира (Килауэа, Толбачик, Этна и др.). Установленные периодичности могут служить эталонами для сравнения с результатами моделирования вулканических процессов.

ЛАБОРАТОРНЫЙ АНАЛОГ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВУЛКАНА. Сконструирована крупногабаритная установка – Комплекс апаратуры моделирования базальтовых извержений

(КАМБИ) – предназначенная для физического исследования газогидродинамических потоков в протяженных прозрачных вертикальных колоннах. Природным прообразом установки является Ключевской вулкан – его питающая система, магматическое вещество, динамические характеристики извержений. Общая высота установки 18,7 м, она состоит из двух систем – моделирующей и регистрирующей. Эксперименты проводятся в газонасыщенном и барботажном вариантах. Параметры моделирования контролируются системой динамического видеослежения и акустической аппаратурой.

ГАЗОГИДРОДИНАМИКА ВУЛКАНИЗМА. На основе анализа данных по извержениям Ключевского вулкана и результатов экспериментального моделирования движения газожидкостных смесей в протяженных вертикальных колоннах КАМБИ установлены механизмы периодических и монотонных типов извержений жидких базальтовых-андезибазальтовых магм. Показано, что характер каждого типа извержения коррелирует с конкретным газогидродинамическим режимом в подводящем канале: пульсирующее фонтанирование – пенные пузырьковые кластеры, стромболианские взрывы – блокированные пузырьковые кластеры или снаряды, периодическое фонтанирование – открытые пузырьковые кластеры (рис.). Систематизация механизмов разных типов извержений позволяет объяснить природу и разнообразие базальтового вулканизма.

ДВУХУРОВНЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА. Во время вершинных извержений землетрясения происходят на верхнем уровне, непосредственно под вулканом (интервал глубин от +5 км до –5 км), они имеют вулканотектоническую и взрывную природу. Во временном интервале между извержениями на нижнем уровне (интервал глубин от 28 до 31 км) реализуется плотный рой Глубоких Длинно-Периодных землетрясений (ГДП-землетрясения), каждое из которых имеет сходные энергетические параметры. Показано, что механизм ГДП-землетрясений определяется процессами закупоривания мелких подводящих каналов оливин-клинопироксеновыми пробками и последующего механического разрушения пробок за счет избыточного гидродинамического давления поступающих расплавов (рис.).

В итоге проведенных исследований установлены: механизм эволюции магм Ключевского вулкана, механизмы периодичностей в динамике извержений, механизмы структурирования вертикальных магматических потоков, механизмы ГДП-землетрясений. Синтез результатов исследований позволил свести воедино ведущие динамические процессы, обеспечивающие извержение вулкана, и впервые создать модель функционирования базальтового-андезибазальтового вулкана (рис.).

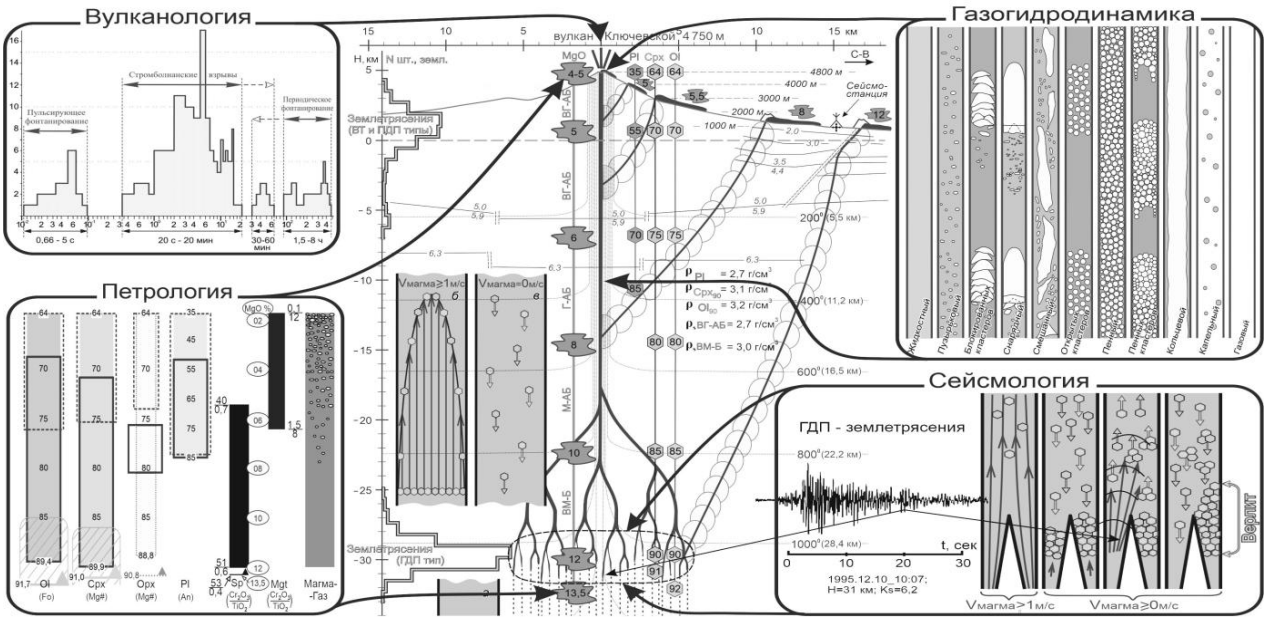



Рисунок. Вулканолого-генетическая модель функционирования Ключевского вулкана

# СИСТЕМОЛОГИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И РАЗВИТИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

*С.В. Корнилков*

ФГБУН «Институт горного дела УрО РАН, *г. Екатеринбург*
kornilkov@igduran.ru

Предмет системологии является комплексным и в соответствии с действующей классификацией горных наук [1] включает теорию проектирования освоения недр, экономику освоения георесурсов, горную экологию и горную информатику, основные положения которых были использованы при исследованиях.

При разработке подходов к обоснованию основных направлений обеспечения горно-металлургического комплекса оценен ресурсный потенциал и перспективы развития его минерально-сырьевой базы [2]. Предложенный метод экспресс-оценки сырьевой базы характеризуется направленным генерированием вариантов стратегий ее расширения и поддержания и основан на: целевом поиске полезных ископаемых, обеспечивающих реализацию приоритетных программ на оцениваемой территории; поэтапном геолого-технологическом обосновании параметров будущих предприятий; использовании совокупности геоинформационных моделей пространственного размещения оцениваемых объектов, их вещественного состава; учете совокупности факторов, обеспечивающих создание условий для эффективного природо-инедропользования, а также экспресс-оценке основных параметров будущих горнодобывающих предприятий.

При разработке методики направленного поиска стратегий поддержания и развития минерально-сырьевой базы горно-обогатительного предприятия выработаны принципы ранговой оценки железорудных месторождений [3], обеспечивающей ранжирование месторождений по степени предпочтительности вовлечения в эксплуатацию.

Сформулированы новые подходы к воспроизводству минерально-сырьевой базы Урала, связанные с оценкой и развитием потенциала неосвоенных территорий уральского севера, обоснована стратегия создания минерально-сырьевых центров при освоении месторождений в сложных природно-климатических условиях, учитывающая не только необходимость комплексного освоения недр, но и комплексного освоения территорий [2].

Решение задач комплексных геолого-технолого-экономических исследований при освоении и развитии минерально-сырьевой базы труднодоступных регионов основывается на разработанной концепции сырьевого обеспечения металлургического производства, основанной на установленном балансе потребления и производства минеральных ресурсов.

Показано, что основой стратегии создания и эксплуатации минерально-сырьевой базы в труднодоступных районах является комплексность освоения недр при одновременном налаживании открытой инфраструктуры эксплуатирующих предприятий [2]. Освоение месторождений по отраслевому принципу приводит к созданию замкнутых производственных систем с максимальной потребностью в трудовых ресурсах. Создание открытой инфраструктуры предприятий обеспечивается путем комплексного освоения недр и территорий, которое обеспечивается созданием управляющей компании, ответственной за создание общей промышленной инфраструктуры региона.

Сформулированы основные принципы проектирования технологий освоения северных месторождений, основанные на этапности ведения горных работ; применении

мощного оборудования и техники в северном исполнении; поэтапном переводе оборудования с дизельным приводом на электрический; выделении технологических зон отработки с учетом строения рудных залежей; организации системы эксплуатационного опробования и оптимизации процессов рудоподготовки; комплексном использовании недр за счет извлечения максимума полезных компонентов и утилизации пород вскрыши и отходов сухого обогащения. Предложена методика приведения оцененных ресурсов к прогнозным запасам руд категории $C_2$. Показано, что при современном уровне изученности Приполярного и Полярного Урала возможна организация горнодобывающих предприятий средней мощности на срок от 10–12 до 30 лет.

Показана технологическая возможность и экологическая эффективность вовлечения в эксплуатацию отходов добычи и переработки руд цветных и черных металлов. Установлены основные причины сдерживания переработки техногенных образований. Предложены критерии оценки эффективности переработки техногенно-минеральных образований.

Обосновано появление новой сырьевой базы титана и ванадия при глубокой переработке титано-магнетитовых руд. В действующую классификацию руд по обогатимости Гусевогорского и Собственно Качканарского месторождений предложено вводить дополнительный поисковый признак – содержание $TiO_2$ в рудах, предназначенных к переработке [4]. Новые схемы повышения качества производимых концентратов при глубокой переработке текущих отходов обогащения титано-магнетитовых руд характеризуются раздельной добычей природных типов руд в карьерах и их раздельным обогащением.

Установлены закономерности построения и правила анализа горных геоинформационных систем как инструмента для оценки и принятия комплексных решений при проектировании и планировании горных работ, а также прогноза последствий отработки, предупреждения возникновения и развития чрезвычайных ситуаций. Предложена методика оценки совокупного техногенного воздействия горных работ на геосреду, основанная на выделении областей (зон) по типам «техногенного поражения» георесурсов и геосистем, трансформирующихся в пространстве и времени. При этом формирование системы индикаторов оценки состояния горнопромышленных территорий как природно-технологических систем на разных этапах их жизненного цикла предлагается основывать на идеологии моделирования переходных процессов, параметры которых контролируются по данным геоинформационного мониторинга [5].

1. *Трубецкой К.Н., Малышев Ю.Н., Пучков Л.А. и др.* Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 478 с.

2. *Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И..В;* Под ред. чл.-корр. РАН В.Л. Яковлева. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. / Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 360 с.

3. *Лапин Э.С., Корнилков С.В. Рудницкий В.Ф. и др.*; Под ред. Лапина Э.С., Корнилкова С.В. Обоснование стратегии ВГОКа по развитию горнорудной базы НТМК до 2025 г./ Екатеринбруг, Изд-во УГГГА, 2004. 111 с.

4. *Корнилков С.В., Дмитриев А.Н., Пелевин А.Е.* Комплексное решение вопросов глубокой переработки титаномагнетитовых руд // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 1. С. 12–18.

5. *Корнилков С.В., Антонинова Н.Ю., Панжин А.А. и др.* О подходах к геоинформационному мониторингу с целью оценки динамики формирования горных предприятий как природно-технологических систем // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 41–51

# ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ: РАСЧЕТ, ПРОГНОЗ И УПРАВЛЕНИЕ

*Л.Ю. Левин*

«Горный институт ФГБУН Пермский ФИЦ УрО РАН, *г. Пермь*
aerolog_lev@mail.ru

Научная школа рудничной аэрологии появилась в Перми в 50-х годах прошлого века с момента основания Молотовского горного института. Направление горной теплофизики всегда присутствовало в работах отдела аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук, но в основном касалось разработки систем воздухоподготовки и расчета тепломассобменных процессов на калийных рудниках. Однако расширение тематики и географии выполняемых научно-исследовательских работ привели на горные предприятия, на которых очистные работы ведут в экстремальных температурных условиях. На больших глубинах особую актуальность приобрели вопросы нормализации и управления тепловым режимом шахт и рудников, где температура пород превышает 24 °С, а температура воздуха – нормируемые Правилами безопасности 26 °С.

Для прогнозирования теплового режима глубоких рудников разработана математическая модель сопряжённого теплообмена вентиляционного воздуха с породным массивом, позволяющая с достаточной точностью рассчитывать температурные изменения движущегося по выработкам воздуха и горных пород с учётом различных осложняющих факторов [1]. К этим факторам относятся: конечное значение коэффициента теплоотдачи стенок выработки, переменная скорость движения воздуха (учёт ответвлений), переменная начальная температура воздуха, поглощение и выделение тепла при испарении и конденсации влаги. Выполнена адаптация разработанной модели теплообмена к расчёту температуры воздуха в воздухоподающих и вентиляционных стволах рудников, для чего в модель был привнесён ещё один осложняющий фактор – увеличение температуры массива с глубиной. Также усовершенствованы методы расчета тепло- и массопереноса в сети горных выработок произвольной топологии с учетом тепловыделений от подземных техногенных источников в виде закладочных твердеющих массивов и горношахтного оборудования. Полученные решения носят оригинальный характер и отличаются от традиционных подходов, предполагающих либо рассмотрение сопряженных задач в рамках отдельных горных выработок, либо решение сетевых задач тепло- и воздухораспределения с использованием модельных упрощающих характеристик, таких как коэффициент нестационарного теплообмена [2].

Все предложенные модели получили численную реализацию в программно-вычислительном комплексе «АэроСеть» и верифицированы многочисленными экспериментальными натурными исследованиями [3].

Развитие методов расчета позволило существенно увеличить точность прогнозирования распределения микроклиматических параметров воздуха в сети горных выработок с учетом временного фактора и стало основой разработки оригинального позабойного способа определения требуемой холодопотребности горных предприятий, а также разработать технологические схемы регулирования теплового режима подземных рабочих зон на основе управления процессами воздухораспределения и решения задач оптимизации параметров горных выработок.

Создана математическая модель расчета теплообменных аппаратов с учетом фазовых переходов, которая позволила разработать высокоэффективные шахтные системы кондиционирования воздуха.

В рамках решения задач по обеспечению безопасных условий труда на существующих горных предприятиях разработаны технологические и алгоритмические основы, критерии и программные средства систем управления тепловым режимом шахт и рудников, основанные на решении задач оптимизации выбора мест и параметров охлаждения воздуха и отведения избыточной теплоты по критерию минимального энергопотребления. Кроме того, разработана и обоснована система нормирования микроклиматических параметров рабочих зон рудников с учетом горнотехнических условий.

В результате проведенных фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований удалось разработать и апробировать системы кондиционирования воздуха различной мощности с отведением избыточного тепла в исходящую вентиляционную струю. Такие системы работают сейчас на одном из крупнейших в мире месторождении калийных солей – Старобинском – в ОАО «Беларуськалий» и на Гремячинском месторождении АО «МХК «ЕвроХим». Для нормирования микроклиматических параметров на глубине 1450 метров при отработке залежей сульфидно-никелевых руд Октябрьского месторождения на руднике «Таймырский» ОАО «ГМК Норильский никель» разработана подземная центральная система кондиционирования воздуха. Мощность установки составляет 6 мегаватт, а общая протяженность сети трубопроводов для транспортировки холода – более 5 километров (рис.).

В настоящее время выполняется проектирование системы шахты Глубокая рудника «Скалистый», где горные работы ведут на глубине более 2000 метров, а прогнозная температура в горных выработках достигнет 52°С [4].

1. *Levin L. Y., Semin M. A., Zaitsev A. V.* Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations //Journal of mining science. 2014. Т. 50. №. 2. С. 371–378.

2. *Semin M. A., Levin L. Y.* Stability of air flows in mine ventilation networks //Process Safety and Environmental Protection. 2019. Т. 124. С. 167–171.

3. *Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.* Аналитический комплекс "Аэросеть". Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015610589, 14.01.2015. Заявка № 2014613790 от 24.04.2014.

4. *Zaitsev, A. V., Levin, L.Yu., Kazakov, B.P., Klyukin, Yu.F.* Thermotechnical systems for normalization of microclimate parameters in deep mines of Nornickel's Polar Division // Gornyi Zhurnal, 2018, (6), pp. 34–40

Рисунок. Система кондиционирования воздуха рудника «Таймырский» ГМК «Норильский никель»

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРАТЕГИИ И ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*И.В. Соколов*

«Институт горного дела ФГБУН УрО РАН», *г. Екатеринбург*
sokolov@igduran.ru

Исчерпание потенциала открытой геотехнологии при освоении глубокозалегающих рудных месторождений актуализирует переход к подземному способу разработки. Анализ опыта разработки 123-х месторождений комбинированным способом показал, что открытые (ОГР) и подземные горные работы (ПГР) во времени ведутся по параллельной либо последовательной схемам. Так, на медноколчеданных месторождениях Урала период совместной разработки составил от 35 лет на Гайском до одного года на Молодежном. В РФ создание научно-методических основ комбинированного способа разработки ведется в рамках научного направления, возглавляемого член-корр. РАН Д.Р. Каплуновым [1].

Особенности подземной геотехнологии (совокупность подситем вскрытия и очистной выемки) при комбинированной разработке состоят в действии негативных специфических факторов (активные аэро- и гидродинамические связи, повышенное горное давление), обусловленных наличием в непосредственной близости от подземных выработок карьерного пространства [2]. Установлены характер и степень их влияния на технико-экономические показатели (ТЭП) освоения прикарьерных запасов. Переходная зона определена как часть глубокозалегающего месторождения по высоте, технология отработки и погашения которой, обеспечивает приемлемый уровень изолированности основных запасов от карьерного пространства. Систематизированы способы подземной разработки переходной зоны по степени и способу изолированности, а количественными критериями служат установленные показатель и коэффициенты. Доказано, что игнорирование принципа изолированности приводит к значительному ухудшению ТЭП при производстве ПГР, следовательно, учет и нейтрализация негативных факторов и актуализация положительных (использование карьера для целей вскрытия и очистной выемки) является необходимым условием обоснования подземной геотехнологии при комбинированной разработке.

Исследована подсистема вскрытие подземных запасов при комбинированной разработке с учетом специфических факторов: схема комбинированной разработки; место заложения вскрывающей выработки (карьер или поверхность); глубина карьера, которые положены в основу систематизации способов и схем вскрытия [3]. Установлено влияние глубины карьера на эффективность вскрытия медноколчеданного месторождения. Разработан восходящий способ, состоящий во вскрытии месторождения на всю глубину разведанных запасов и восходящей камерной выемке с закладкой. Его преимущества состоят в: использовании выработанного пространства для складирования отходов; повышении безопасности путем снижения напряжений до двух раз в зоне ведения очистных работ; снижении себестоимости добычи до 30% за счет уменьшения расхода цемента на закладку и снижения разубоживания. Установлено что оптимальным является вскрытие автоуклоном и нисходящая разработка. Сделан вывод, что стратегия, основанная на восходящем способе, например, при разработке медноколчеданных месторождений с небольшими запасами (до 20 млн т) обладает заметными достоинствами и позволяет использовать преимущества как параллельной схемы, так

и последовательной. При этом предельная глубина карьера определяется по фактическому положению ОГР и ПГР на заключительном этапе освоения месторождения, т.е. фактическим, а не прогнозным путем.

Определена стратегия освоения глубокозалегающих железорудных месторождений, основанная на экологически сбалансированной подземной геотехнологии, как комплекс взаимоувязанных мероприятий, включающий установление параметров технических, технологических и организационных процессов с целью максимального эколого-экономического эффекта от эксплуатации всех запасов месторождения [4]. Предложено размещение обогатительных комплексов (ОК) под землей, что позволит: резко (на 90%) сократить площади земель, занимаемых поверхностными ОК; практически ликвидировать экологическое воздействие; сократить экологические платежи; снизить на 20–35% стоимость строительства ПК по сравнению с поверхностным. На примере шахты Естюнинская сформировано пять вариантов стратегии и по комплексному эколого-экономическому критерию установлена оптимальная, базирующаяся на: комбинированном нисходяще-восходящем способе отработки, обеспечивающем замкнутость горнотехнической системы; утилизации отходов в выработанном пространстве; применении ПК в оптимальной области, что обеспечивает максимальный экономический и экологический эффект.

Созданы научно-технологические основы комплексной геотехнологии добычи и переработки высокоценного кварца на основе комбинированной системы разработки (КСР) и специальной технологии взрывной отбойки, обеспечивающей кардинальное снижение выхода некондиционной фракции и потерь кварца в недрах [5]. Кыштымское месторождение является единственным в России стабильным источником сырья для инновационных отраслей отечественной промышленности. Однако, применяемой камерно-столбовой системе разработки присущи высокие потери в междукамерных целиках (МКЦ) (до 30%) и большой выход некондиционной фракции кварца (до 22%). Установлена эффективность КСР за счет формирования МКЦ трапециевидной формы и их подэтажного обрушения. Экспериментальные исследования в подэтаже 324/346м показали, что потери в МКЦ составляют 9%, а применение плоской системы зарядов обеспечивает минимизацию потерь кварца от переизмельчения до 12%. Внедрение геотехнологии позволяет увеличить сырьевую базу предприятия в 1,4–1,5 раза.

Значимость исследований для экономики страны заключается в научно-методическом обосновании стратегий и инновационных геотехнологий, применение которых обеспечивает своевременный переход от ОГР к ПГР, ввод и поддержание производственных мощностей, существенно повышает комплексность освоения недр.

1. *Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В.* Комбинированная геотехнология. М.: Руда и металлы, 2003. 558с.

2. *Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В.*; под общ. ред. д-ра техн. наук И.В. Соколова // Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений; Мин-во науки и высш. обр. РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 340 с.

3. *Соколов И.В., Антипин Ю.Г.* Систематизация и экономико-математическое моделирование вариантов вскрытия подземных запасов при комбинированной разработке месторождений // Горный журнал. 2012. № 1. С. 67–71.

4. *Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В.*; под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева // Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2018. 360 с.

5. *Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г. и др.* Результаты экспериментальных исследований подземной добычи высокоценного кварца в условиях Кыштымского рудника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 1. С. 97–106.

# НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

*Т.Н. Александрова*

ФГБУН «Санкт-Петербургский горный университет», *г. Санкт-Петербург*
alexandrovat10@gmail.com

На сегодняшний день основным вызовом для современной перерабатывающей промышленности является необходимость адаптации применяемых технологических решений под меняющуюся структуру минерально-сырьевой базы. Сокращение количества месторождений с высоким содержанием ценных компонентов в руде, а также ухудшение минералого-технологических характеристик сырья значительно снижает эффективность обогатительных переделов [1]. Разработка энергоэффективных технологий обогащения и переработки минерального и техногенного сырья, обеспечивающих получение готовой, конкурентоспособной на мировом рынке, как по технологическим, так и экологическим критериям, продукции, а также расширение минерально-сырьевой базы за счет повышения степени использования сырьевого потенциала природных и техногенных месторождений является актуальной задачей, решение которой позволит повысить полноту и комплексность использования сырья [2].

Основные задачи, которые решаются для достижения поставленной цели:

– выявление основных закономерностей процессов рудоподготовки и обогащения для извлечения тонкодисперсных частиц ценных компонентов, а также структурных преобразований поверхности ценных минералов в результате их направленной модификации;

– обоснование и разработка эффективных методов извлечения ценных компонентов из минерального и техногенного сырья с использованием физико-химических воздействий на основе экспериментальных исследований и численного моделирования, позволяющих рентабельно перерабатывать руды,

– разработка технических и технологических решений, а также нетрадиционных методов обогащения, обеспечивающих высокое извлечение мелких частиц благородных, редких и цветных металлов в концентрат из минерального и техногенного сырья и дальнейшая доводка его с получением готовой продукции.

Решение поставленных задач, позволило получить результаты, которые обладают научной новизной (получено более 30 патентов) и практической значимостью, разработаны рекомендации для внедрения для многих промышленных горно-обогатительных и горнометаллургических предприятий. В области рудоподготовки и селективной дезинтеграции: произведена как количественная, так и качественная оценка прочностных свойств изученных материалов (руд цветных и благородных металлов), результаты которой позволили прогнозировать показатели их разрушения в промышленных рудоподготовительных аппаратах с использованием компьютерных программы JKSimmet. Результаты морфолого-структурного анализа исследуемых проб позволили установить зависимости между минералогическими и микроструктурными и технологическими характеристиками. Получены зависимости параметров и критериев измельчения от минералогических, текстурных и структурных и физико-технологических свойств минералов, а также выполнена интерпретация полученных данных. Теоретически

обоснованы взаимосвязь и взаимовлияние минералого-геохимических, структурно-текстурных и физико-технических свойств минералов в процессах селективной дезинтеграции и сепарации при переработке минерального сырья различного генезиса. Результаты проведенных исследований позволили обосновать комплексный подход к изучению механизмов разрушения, построению моделей раскрытия, оценке содержания рудных минералов в сростках, анализу гранулометрического состава и пространственному распределению их зерен и пр. Установлено, что технология рудоподготовки с применением пресс-валков высокого давления, благодаря ее энергоэффективности, давно и успешно конкурирует с технологией полусамоизмельчения, особенно при переработке железных руд, позволяя вывести часть пустой породы на этапе предконцентрации и снизить затраты на последующее измельчение и обогащение. Объемное разрушение в данных аппаратах в сочетании с последующей пневматической классификацией повышает вероятность селективной сепарации и в некоторых случаях позволят исключить последующее шаровое измельчение на фабриках, что революционизирует процессы рудоподготовки.

Основными особенностями руд цветных и благородных металлов являются: комплексность сырья, низкие содержания ценных компонентов, сложность и изменчивость вещественного состава руд. Одной из наиболее перспективных областей для внедрения технологий, повышающих эффективность переработки, являются флотационные методы обогащения. Это обусловлено возможностью применения флотации для сепарации подавляющего большинства типов руд и гибкостью режимов. Флотация руд цветных и благородных металлов является наиболее сложной с позиции прогнозирования ее эффективности. Разработана технология переработки углеродистых упорных сульфидных благороднометалльных руд, основанная на применении токов сверхвысокой частоты (СВЧ) на продукты флотационного обогащения, позволяющая повысить извлечение ценных компонентов в концентрат. Выявлены и обоснованы два направления применения СВЧ воздействия на сырье, обеспечивающие укрупнение низкоразмерных структур благородных металлов, на примере углеродистых концентратов и снижение упорности сульфидных флотационных концентратов за счет термической деструкции наиболее сорбционно-активной углеродистой составляющей.

Предложена методика комплексной оценки физико-энергетического воздействия на исходное сырье и продукты переработки, позволяющая количественно оценить степень воздействия на сырье, оценить процессы активации и деструкции образцов и компонентов в них. Разработанная методика включает проведение термогравиметрического анализа образцов до и после воздействия не менее чем при трех скоростях нагрева в воздушной среде и обработку полученных данных с применением интегрально-кинетического и дифференциального метода анализа для расчета энергии активации процесса.

Выявлена высокая флотационная активность пустой породы при флотации упорных сульфидных золотосодержащих руд. Обоснована комбинация реагентов-депрессоров направленного действия для подавления флотоактивной породообразующей минерализации, позволяющая повысить качество флотационных концентратов путем снижения извлечения в них пустой породы, не снижая при этом извлечение ценных компонентов. Таким образом, полученные результаты могут стать фундаментальной основой при разработке технологических решений для обогащения и переработки труднообогатимого минерального сырья различного состава и происхождения.

1. *Чантурия В.А., Вайсберг Л.А., Козлов А.П.* Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение Руд. 2014. № 2 (350).

2. *O'Connor, C., & Alexandrova, T.* (2021). The geological occurrence, mineralogy, and processing by flotation of platinum group minerals (PGMs) in South Africa and Russia. Minerals, 11(1), 1–15.

# РИСКИ ДЕГРАДАЦИИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В РОССИИ

*А.В. Брушков*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*
brouchkov@geol.msu.ru

Происходящие изменения климата и повышение температур воздуха, которые, по прогнозам [1], проявятся в Арктике в большей мере, чем в других регионах, вызывают ряд последствий для природной среды, в числе которых вероятная деградация вечной мерзлоты – повышение ее температур, частичное или полное протаивание. Из 35 млн. кв. км территории, занятой вечной мерзлотой на Земле, 11 млн. кв. км приходится на нашу страну, что составляет около 65% площади РФ. Деградация многолетнемерзлых толщ, в свою очередь, приведет к изменениям природных условий, потере несущей способности оснований зданий и сооружений и активизации физико[геологических процессов. По разным оценкам, в течение XXI века вечная мерзлота может протаять с поверхности на территории, составляющей 10–50% и более от общей площади ее распространения.

Связь между температурами воздуха и температурным режимом горных пород опосредована влиянием снежного и растительного покрова, условиями увлажнения и теплофизическими свойствами почвы и верхних горизонтов литосферы. Поэтому рост температур мерзлых пород не соответствует увеличению температур воздуха, а, как правило, проявляется в меньшей степени. При этом в большинстве регионов криолитозоны наблюдается частичная деградация вечной мерзлоты [2].

Изменения наступают быстрее в области распространения засоленных мерзлых пород, к которой относится Арктическое побережье и Центральная Якутия. Засоленные многолетнемерзлые породы представляют собой особый тип мерзлых отложений, занимающий промежуточное положение между мерзлыми и немерзлыми породами и отличающийся способом образования, сочетанием мерзлых и немерзлых элементов строения, непостоянством степени засоления и неблагоприятными инженерно-геологическим свойствами, прежде всего низкой несущей способностью [3]. В частности, для состава засоленных мерзлых отложений побережья Северного Ледовитого океана характерно преобладание хлористого натрия, большое содержание частиц пылеватой фракции, коллоидов и органического вещества, что определяет понижение температуры замерзания и высокую деформируемость под нагрузкой. Установлено увеличение засоленности с глубиной в разрезах (до 10–15 м), имеющее практическое значение в фундаментостроении. Преимущественное использование в криолитозоне свайных фундаментов висячего типа определяет их высокую чувствительность к изменениям температуры, особенно в засоленных грунтах.

Широкое развитие льдистых мерзлых толщ и подземных льдов (повторно-жильных, пластовых и других) в ряде регионов [3] определяет необратимость происходящих изменений в строении верхних горизонтов отложений, нарушений поверхности и трансформации северных ландшафтов.

Вечная мерзлота содержит микроорганизмы различных таксономических групп [4]. Среди них установлена заметная составляющая неизвестных видов бактерий, а в многолетнемерзлых отложениях верхнего плейстоцена найдены разнообразные вирусы

(бактериофаги). В мерзлоте находятся и патогены, вызывающие опасные болезни животных и человека. При оттаивании мерзлых пород содержащиеся в них микроорганизмы, попадая в современную биосферу, очевидно, взаимодействуют с ней, вызывая различные последствия, в том числе неблагоприятные.

Результатом деградации вечной мерзлоты становятся также повреждения растительного покрова и развитие термокарста [5], термоэрозия и термоабразия, заболачивание и эмиссия парниковых газов [3], увеличение стока рек, возможная, несмотря на тенденцию к повышению продуктивности, деградация лесов [6]. Ряд из них создает по отношению к деградации мерзлоты положительные обратные связи, например, нарушения растительности или термокарст, вызывающий ускорение оттаивания.

Очевидным следствием повышения температур мерзлых пород с точки зрения интересов народного хозяйства является потеря несущей способности оснований зданий и инженерных сооружений, особенно на засоленных мерзлых грунтах, и разрушение инфраструктуры городов и поселков, а также промышленных предприятий. В настоящее время доля деформированных зданий в некоторых населенных пунктах достигает 40 и более %. Так, если в 1997 г из 268 зданий поселка Амдерма на побережье Карского моря были деформированы 108, а из 66 тяжелых каменных зданий трещины и значительные осадки имеют 32, то в 2021 г. из остающихся 220 зданий деформированы 129. Нередко причиной деформаций оснований зданий и сооружений является нарушение температурного режима грунтов при эксплуатации, преимущественно, из-за теплового влияния зданий, перераспределения и накопления поверхностных вод на территории застройки. Повышение температур мерзлых пород в результате изменений климата приведет к дальнейшим деформациям оснований и фундаментов, и, следовательно, к новым разрушениям. Только для Арктической зоны РФ предполагаемый ущерб экономике к 2050 г. от потери несущей способности оснований зданий был нами оценен, в зависимости от различных сценариев изменения климата, в 5–7 триллионов рублей [2].

Обеспечение устойчивости инфраструктуры в условиях изменения климата предполагает организацию системы геокриологического мониторинга. Ее задачи должны включать получение, сбор, обработку и анализ данных о состоянии криолитозоны, прогноз температурного режима грунтов и развития мерзлотных процессов, а также разработку технических решений по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных процессов на осваиваемой территории. Для выполнения тепловых расчетов и разработки прогнозов состояния вечной мерзлоты важен, кроме наблюдений за температурами горных пород, мониторинг снежного и растительного покрова, сезонного оттаивания, влажности и теплофизических характеристик почв и грунтов, режима поверхностного и подземного стока.

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021. 3949 p.

2. *Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др.* Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне РФ к середине XXI века. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 1. С. 14–31.

3. *Harris S., Brouchkov A., Cheng G.* Geocryology: Characteristics and Use of Frozen Ground and Permafrost Landforms. Taylor & Francis (United Kingdom), 2017. 766 p.

4. *Brouchkov A., Kabilov M. et al.* Bacterial community in ancient permafrost alluvium at the Mammoth Mountain (Eastern Siberia). Gene, Elsevier, 2017. № 636. P. 48–53.

5. *Brouchkov A., Fukuda M. et al.* Thermokarst as a short-term permafrost disturbance, Central Yakutia. Permafrost and Periglacial Processes, John Wiley & Sons Inc., 2004. 15, № 1. P. 81–87.

6. *Baltzer J.L., Veness T. et al.* Forests on thawing permafrost: fragmentation, edge effects, and net forest loss. Glob Chang Biol. 2014. 20 (3). P.824–834.

# ОПЫТ СНИЖЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА И ВИБРАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, В ТОМ ЧИСЛЕ ГОРНЫХ МАШИН

*А.В. Васильев*

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», *г. Самара*
avassil62@mail.ru

Негативное воздействие шума и вибрации сложных технических установок, в том числе горных машин, представляет собой серьезную проблему. Значительные уровни шум аи вибрации генерируются при работе горных машин, буровых станков, автосамосвалов, вибрационных грохотов, вибровозбудителей и др. [1, 2]. Актуальную проблему представляет снижение низкочастотного шума и вибрации сложных технических систем, в том числе горных машин и оборудования, так как традиционные средства борьбы с шумом и вибрацией недостаточно эффективны в низкочастотном диапазоне [3, 6].

Автором за более чем тридцатилетний период научных исследований низкочастотного шума и вибрации сложных технических систем получен ряд научных результатов, в том числе:

− созданы методологические основы классификации активной и гибридной компенсации низкочастотного звука и вибрации сложных технических установок [3, 4];

− разработана математическая модель передачи низкочастотного звука и газодинамических пульсаций в газоводных системах энергетических установок при наличии активного акустического излучения [3];

− разработаны теоретические основы активной и гибридной компенсации низкочастотных газодинамических пульсаций в газоводах сложных технических машин и установок и вызванных ими низкочастотного звука и вибрации [3, 7, 16];

− исследовано использование виртуальных экстраполирующих микрофонов для многофункциональной активной и гибридной компенсации. Предложено использование быстрого преобразования Фурье реальных сигналов микрофонов для отдельной оценки амплитуды и фазы в позиции виртуального микрофона путем экстраполяции и для коррекции амплитудных и фазовых рассогласований между микрофонами [5];

− исследовано воздействие факторов внешней и рабочей среды на элементы и устройства компенсации низкочастотного звука и вибрации сложных технических установок и присоединенных механических систем в зависимости от типов компенсации: пассивной, активной и гибридной [3];

− разработаны и апробированы программные продукты по расчету и снижению низкочастотного звука и вибрации сложных технических установок и присоединенных систем [15]; и др.

В рамках гранта Российского научного фонда проведены экспериментальные исследования характеристик низкочастотных газодинамических пульсаций давления газа, а также вызванных ими шума и вибрации на установках различных видов: компрессорах насосах, двигателях и др. Установлено, что максимальными при всех измерениях являются пульсации давления газа на основной частоте работы энергетических установок; интенсивность дискретных составляющих пульсаций давления газа зависит от давления нагнетания. Чем выше давление нагнетания, тем больше амплитуда пульсаций.

Экспериментально показано, что пульсации давления газа вносят основной вклад в формирование низкочастотного звука и вибрации энергетических установок.

С использованием полученных теоретических результатов разработаны, апробированы и внедрены эффективные технические решения по снижению низкочастотного шума и вибрации сложных технических установок и присоединенных механических систем [8–14, 16]. В том числе разработаны эффективные гасители колебаний давления, устройства активной компенсации низкочастотного шума и вибрации, пассивные и активные виброизолирующие опоры, использование которых обеспечивают высокую степень виброизоляции, что позволяет снизить влияние вибрации на установку и повысить надежность и долговечность ее эксплуатации, а также производительность работы.

Исследования проведены в рамках гранта Российского научного фонда, соглашение №20-19-00222.

1. *Вайсберг Л.А.* Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986, 144 с.

2. *Блехман И.И., Вайсберг Л.А.* Использование самосинхронизирующихся вибровозбудителей в горных вибрационных машинах // Горный журнал. 2000. №11–12. С. 81–82.

3. *Васильев А.В.* Снижение низкочастотного шума и вибрации в газоводах энергетических установок с использованием метода активной компенсации: Монография – Санкт-Петербург, издательство Санкт-Петербургского политехнического университета, 2004. – 294 с. ISBN 5-7422-0806-5.

4. *Васильев А.В.* О принципах классификации систем активной компенсации низкочастотного шума и вибрации. «Известия Самарского научного центра РАН», г. Самара, Октябрь – Декабрь 2006 г. т.8, №4 (18), с. 1156–1170.

5. *Васильев А.В., Пимкин В.В.* Активная компенсация низкочастотного звука с использованием экстраполирующих виртуальных микрофонов. В научном издании «Известия Самарского научного центра РАН», г. Самара, 2011 г., т. 13, №4, с. 274–280. ISSN 1990–5378.

6. *Васильев А.В.* Моделирование и снижение низкочастотного шума и вибрации энергетических установок и присоединенных механических систем. Монография. Самара, изд-во Самарского научного центра РАН, 2011. 12,5 п.л., 216 с., ил. ISBN 978-5-93424-531-4.

7. *Васильев А.В.* Шумовая безопасность урбанизированных территорий. В научном издании «Известия Самарского научного центра РАН», г. Самара, 2014 г., т. 16, № 1–1, С. 299–305. ISSN 1990-5378.

8. *Васильев А.В.* Способ и устройство комплексного снижения низкочастотного шума транспортного средства. Патент РФ №2275520, опубл. в бюлл. №12, 27.04.2006 г. и др.

9. *Глейзер А.И., Васильев А.В., Бахтемиров А.И.* Гаситель крутильных колебаний. Патент РФ на изобретение № 2470202. Опубл. 20.12.2012 г. Бюл. №35, 5 с.

10. *Глейзер А.И., Васильев А.В., Бахтемиров А.И.* Виброопора. Патент РФ на изобретение № 2466313. Опубл. 10.11.2012 г. Бюл. №31, 5 с.

11. *Старобинский Р.Н., Васильев А.В., Крохин В.Н., Волченков В.И., Десяткин А.М.* Гаситель колебаний давления системы всасывания поршневой машины. Авторское свид. СССР №1789748 А1, БИ №3, 1993.

12. *Чернов Н.С., Васильев А.В., Мурановский В.П.* Гаситель колебаний давления. Патент РФ на изобретение № 2459999. Опубл. 27.08.2012 г. Бюл. № 24, 4 с.

13. *Vassiliev A.V.* Compact active noise control units for automobile intake low-frequency noise attenuation. Proc. of "ACTIVE 97" Symp., Budapest, Hungary, August 1997, p.587–594.

14. *Vasilyev A.V.* Development and approbation of methods and technical solutions of reduction of vibration of power plants and joining mechanical systems. Procedia Engineering. 2015. Volume 106. pp. 354–362. Elsevier edition.

15. *Vasilyev A.V.* Research of low-frequency gas pressure oscillations in duct systems of power plants using program provision. Journal “Akustika”, Czech Republic, Volume 34, November 2019, pp. 123–126.

16. *Vasilyev A.V.* Automobile internal combustion engine low frequency noise reduction using active noise control solutions. Journal “Akustika”, Czech Republic, Volume 34, November 2019, pp. 113–117.

# ДИНАМИКА ГРУНТОВ – АКТУАЛЬНОЕ НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ГЕОЭКОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

*Е.А. Вознесенский*

ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН», *г. Москва*
eugene@geoenv.ru

Основная содержательная задача геоэкологии как междисциплинарного научного направления заключается в изучении изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосфер Земли под влиянием природных и антропогенных факторов и в обосновании их рационального использования. Решение этой задачи предполагает изучение образующихся в результате человеческой деятельности природно-технических систем, и разработку механизмов управления ими, включая геоэкологическое обоснование проектирования, безопасного размещения и эксплуатации инженерных сооружений. Безопасность инженерных сооружений, в свою очередь, требует глубокого понимания природы и закономерностей развития геологических и инженерно-геологических процессов в массивах грунтов с учетом особенностей их состава, состояния и свойств.

Особое значение в современных условиях приобретает корректная оценка реакции грунтов на динамические воздействия различной природы и интенсивности, что обусловлено как возведением ответственных сооружений в сейсмических районах, так и формированием техногенных полей вибраций от движущегося транспорта, работы энергетических и промышленных предприятий, ветровых и волновых нагрузок на акваториях. Различные дисперсные грунты могут реагировать на такие воздействия как полной потерей прочности, например, разжижением при землетрясениях, так и накоплением значительных дополнительных деформаций, прогноз которых необходим для обеспечения устойчивости и эксплуатационных характеристик сооружений.

Теоретические основы расчета оснований сооружений в условиях динамических нагрузок были заложены в СССР в 30-х – 50-х годах XX века работами Д.Д. Баркана, О.Я. Шехтер, О.А. Савинова и др. Наиболее значимые успехи в области исследования динамической реакции дисперсных грунтов в последующие годы связаны с работами Н.Н. Маслова, Б.М. Гуменского, П.Л. Иванова, а за рубежом – Г.Б. Сида, А. Казагранде, Г. Кастро, К. Ишихары. Глубокое изучение природы процессов, происходящих в грунтах под динамическими нагрузками, с позиций инженерной геологии было начато в нашей стране под руководством Е.М. Сергеева, В.Т. Трофимова и В.И. Осипова. Вместе со своими коллегами и учениками они исследовали тиксотропные и плывунные свойства глинистых, песчаных и лессовых грунтов, условия их разжижения.

Базируясь на систематическом анализе собственного экспериментального материала по динамической неустойчивости широкого спектра грунтов, а также на мировом опыте исследований Е.А. Вознесенским был разработан энергетический подход к оценке динамической неустойчивости грунтов [1], основная идея которого заключается в том, что в основе этих явлений лежит единый по своей природе стохастический механизм, который заключается в способности грунтов накапливать от цикла к циклу воздействия некоторую долю рассеянной за счет своих гистерезисных свойств энергии воздействия. Поэтому при динамическом нагружении происходит увеличение внутренней энергии системы, и изменение соотношения между внешней силой и устойчивостью структурных связей. Представленный подход включает: а) рассмотрение энергетики процессов динамического деформирования и разрушения грунтов в общем виде на основе

балансовых уравнений, б) формулировку единых энергетических критериев динамической неустойчивости для любых грунтов, в) методику экспериментальных исследований грунтов, позволяющих провести надежный расчет предложенных критериев. Важным достижением подхода стала возможность прогноза динамических деформаций грунтов с помощью простых аналитических моделей на основе экспериментально определяемых энергетических критериев. Энергетический подход позволил выявить ряд новых закономерностей динамической неустойчивости различных дисперсных грунтов – песчаных, глинистых, пылеватых [2].

Разработанные методические решения в оценке поведения грунтов при динамических воздействиях были затем реализованы при решении практических задач обеспечения безопасности ответственных сооружений в сейсмических районах (Крымский мост, проекты «Сахалин-1», «Сахалин-2», олимпийские объекты в Сочи) и на участках развития опасных геологических процессов: нефтегазопромысловых сооружений и подводных трубопроводов на шельфе Охотского и Карского морей, автодорог федерального значения, объектов атомной промышленности (АЭС «Пакш»), тепловой и ветровой энергетики. Накопленный в ходе реализации исследовательских программ по этим проектам уникальный материал в сочетании с результатами поисковых научных исследований стал основой для разработки первого отечественного стандарта на динамические испытания грунтов (ГОСТ Р 56353–2015).

Установленные временные эффекты деформирования и разрушения грунтов в сочетании с энергетическими критериями привели к выработке концепции пороговых деформаций грунтов при любом режиме нагружения и к объединению задач динамики и нелинейной механики грунтов. Поскольку грунты представляют собой нелинейные материалы во всем возможном диапазоне деформаций, то зависимость между напряжениями и деформациями нельзя описать единственным уравнением состояния, и корректное выделение разных стадий деформирования грунта является ключевым моментом успешного описания соответствующих процессов математически. Разделяющие эти стадии пороговые значения деформаций должны знаменовать качественные изменения величин смещений и механизма энергетических превращений, поскольку деформирование грунта представляет результат взаимного смещения его структурных элементов в постоянном или переменном поле напряжений с разрывом связей между этими элементами или с их ослаблением, и, следовательно, сопровождается превращениями энергии из одних видов в другие [3].

Такой анализ поведения грунтов позволил разработать концепцию деформационной неустойчивости – докритического состояния грунтов, предшествующего разрушению, связанного с началом разрыва или ослабления значимого количества межчастичных контактов и сопутствующей перестройкой порового пространства. Это состояние достигается при определенной пороговой деформации (обычно менее 0.01), что может быть установлено экспериментально на основании энергетических критериев и описывается в терминах напряжений [4].

Выявление других пороговых деформаций грунтов, лежащих в том числе в диапазоне малых и сверхмалых их величин, динамическими методами подтверждает возможности этого научного направления в решении современных задач геоэкологии по обеспечению безопасности инженерных сооружений и рационального использования грунтовых оснований.

1. *Voznesensky E.A., Nordal S.* Dynamic instability of clays: an energy approach // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1999. Vol. 18, № 2. P. 125–133.

2. *Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов. М.: ЛЕНАНД, 2019. 264 с.

3. *Вознесенский Е.А.* Пороговые деформации в грунтах // Геотехника, 2018. № 5–6. С. 6–16.

4. *Усов А.Н., Вознесенский Е.А.* Деформационная неустойчивость в глинистых грунтах. Возникновение и идентификация // Инженерная геология, 2016. № 2. С. 14–21.

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО НЕФТЕГАЗОВОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

*Э.С. Закиров*

ФГБУН «Институт проблем нефти и газа РАН», *г. Москва*
ezakirov@ogri.ru

Мировая нефтегазовая наука в области разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений озабочена максимально полным извлечением нефти и газа из природных резервуаров. На сегодняшний день в мировой практике планка признания удовлетворительной величины коэффициента полезного действия нефтяного недропользования – достижение коэффициента извлечения нефти (КИН) 60% и выше. В России данный коэффициент крайне низок. Если в советские времена страна стремилась к КИН на уровне 42–45%, то сейчас Россия может рассчитывать на конечный КИН не более 33% в среднем по всем месторождениям нефти. Не лучше обстоит ситуация с газовыми, газоконденсатными месторождениями. Так, коэффициент газоотдачи по всем месторождениям предполагается в размере 100%. Однако, на сегодня нередко встают проблемы с продолжением эксплуатации газовых месторождений-гигантов с остаточными запасами низконапорного газа в сотни миллиардов кубометров. Суммарные же запасы подобного газа по стране исчисляются триллионами кубометров. Еще острее стоит проблема с коэффициентом конденсатоотдачи. Ибо практически все газоконденсатные месторождения в стране разрабатываются в режиме истощения пластовой энергии. Печальна ситуация в России с полнотой извлечения нефти из нефтяных оторочек (НО). КИН по НО обычно находится в диапазоне 10–30% от начальных геологических запасов. В России нередки случаи с достижением КИН НО на уровне начальных процентов. Встречаются даже случаи полного пренебрежения запасами нефти в оторочке при наличии обширных газоконденсатных шапок.

Таким образом, состояние дел в отечественном нефтегазовом недропользовании достаточно проблемное. К тому же страна вступает в Эпоху трудноизвлекаемых запасов нефти и газа. В этой связи актуальными представляются обсуждаемые ниже и создаваемые Закировым Э.С. решения по 3D компьютерному моделированию процессов разработки, интерпретации данных исследований скважин и пластов, а также технологическим решениям, способствующих повышению компонентоотдачи пластов.

Так, предложен ряд многофункциональных технологий, обеспечивающих одновременное повышение коэффициентов газо-, нефте-, конденсатоотдачи при разработке нефтегазовых месторождений. Это дает не только увеличение текущих уровней отбора, но и максимально рациональное использование запасов месторождений нефти и газа, позволяющее избежать нежелательных геоэкологических проблем как при разработке, так и переформировании остаточных запасов после окончания добычи.

С переходом в 2000 году в России к 3D компьютерному моделированию, проекты разработки нефтегазовых месторождений создаются с помощью трехмерных адресных постоянно действующих геолого-технологических моделей. Однако, целью 3D компьютерного моделирования должно выступать не проведение единичных прогнозных расчетов, а оценка и управление рисками и неопределенностями геологического строения, а также технологических параметров эксплуатации скважин.

В области решения прямых (прогностических) задач теории фильтрации в 3D постановке актуальным является учет тензорного характера проницаемости. Исторически

данный факт считался важным при разработке месторождений с сильно неоднородными и анизотропными коллекторами. Однако, благодаря развитию методов 3D геологического моделирования, включая методы двухточечной геостатистики, обсуждаемый подход существенно расширил область своей применимости до практически всех месторождений нефти и газа. Поскольку при переносе (upscaling'е) неаддитивных свойств (например, абсолютной проницаемости) с мелкой 3D геологической модели на более грубую 3D гидродинамическую для сохранения разрешающей способности мелкомасштабной проницаемости (на подсетке), ее характерной неоднородности, в рамках одного осредняемого крупного сеточного блока приходится полностью заполнять матрицу тензора абсолютной проницаемости.

Какой бы точной ни была 3D адресная геологическая модель, рано или поздно прогноз добычи по ней начинает различаться с наблюдаемым фактом на промысле. В случае существенного расхождения наблюдаемых на месторождений данных и результатов расчетов необходимо автоматизированно решать задачи адаптации истории разработки к фактическим данным, представляющие собой обратные задачи теории фильтрации. С использованием современных методов теории оптимального управления возможно достоверное определение по зонам коэффициентов пористости и проницаемости по 3 главным осям тензора проницаемости, геометрических характеристик пластов (как по площади, так и по вертикали), функций относительных фазовых проницаемостей, параметров численных aquifer-ов, например, Фетковича. Вершиной в данной области можно считать геологически согласованную адаптацию. Когда в качестве управляющих параметров выступают геостатистические параметры 3D геологической модели, а адаптация истории производится способом, не нарушающим принципов 3D геологического моделирования.

Благодаря все возрастающей точности модели после ее адаптации, интерес представляют актуальные и сложные оптимизационные задачи по регулированию разработки одно- и многопластовых месторождений нефти. Тогда без бурения новых скважин, только за счет перераспределения отборов и закачки по всем добывающим и нагнетательным скважинам во времени, удается значительно улучшить экономические показатели добычи (на 10–30%), доставляя максимум дисконтированной добыче нефти.

Все соответствующие задачи решаются в 3D многофазной постановке, с учетом особенностей разработки месторождений природных углеводородов, а также особенностей геологического строения продуктивных пластов, без упрощающих предположений. Созданные алгоритмы реализованы в виде некоммерческих программных комплексов. Развитое программное обеспечение (ПО) соответствует актуальному направлению "управление разработкой в замкнутом цикле". Оно представляет особенный интерес для интеллектуальных скважин и месторождений, когда на основе ассимиляции данных от разнообразных забойных сенсоров, управление скважиной осуществляется поинтервально, что обеспечивает максимизацию удельной продуктивности скважин во времени (с учетом их взаимовлияния), а значит и КИН.

Интерес также представляет набор специализированных технологий исследования скважин и пластов. За счет комплексирования данных геофизического мониторинга и данных добычи, создания разнонаправленных многофазных фильтрационных течений в околоскважинной области, через решение обратных задач возможно определение свойств пласта не в лабораторных, а в промысловых условиях. Предложенные и апробированные на практике подходы позволяют преодолевать масштабный фактор, присущий результатам интерпретации данных лабораторных исследований.

Созданные алгоритмы и ПО для 3D гидродинамических моделей апробированы на месторождениях Норвегии (Tommeliten Gamma, Oseberg, Troll), подземных газохранилищах ФРГ (Lauchstaedt, Ketzin), а также на отечественных месторождениях сложного строения и состава (Приобское, Урненское, Приразломное и др.). Результаты фундаментальных исследований нашли применение на практике в отечественных проектах по разработке месторождений нефти и газа (месторождения Яро-Яхинское, Северо-Васюганское, Талинское, Прибрежное, Приразломное, Приобское, Урненское).

# ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЭК СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

*И.А. Керимов*

ФГБУН Институт физики Земли им.О.Ю. Шмидта РАН, *г. Москва*
kerimov@ifz.ru

ТЭК Северного Кавказа включает нефтегазовую отрасль, гидроэнергетику, геотермальную энергетику, ВИЭ и др. Развитие и эксплуатация предприятий ТЭК порождает ряд геоэкологических проблем, обусловленных наряду с технологическими аспектами, природно-климатическими и социально-экономическими факторами региона, имеющего повышенную сейсмическую активность.

**Геофизические поля и сейсмичность Восточного Предкавказья**

Глубинные разломы играют определяющую роль в современной геодинамике региона, влияют на пространственно-временные закономерности размещения гипоцентров и эпицентров землетрясений Информация о разломной тектонике служит одним из основных исходных материалов при детальном изучении сейсмической активности в целях ДСР и определения максимально возможных землетрясений. Основным методом изучения разломной тектоники региона является анализ геофизических данных.

Разрабатан метод 3D аппроксимации геоданных – метод F-аппроксимации, основанный на методе линейных интегральных представлений академика В.Н. Страхова и методе решения некорректных задач академика А.Н. Тихонова. Метод F-аппроксимаций. является уникальным методом спектрального анализа геофизических полей, заданных на нерегулярной сети с учетом разновысотности измерений. Метод реализован в пакете компьютерных программ и апробирован на модельных и реальных материалах. Данный подход также используется для обработки топографических и геоморфологических данных, морфометрического анализа рельефа земной поверхности, при решении геоэкологических задач.

По результатам интерпретации геолого-геофизических данных составлены карты разломов Терско-Каспийского прогиба (ТКП), Западного Предкавказья и др. регионов, которые легли в основу анализа связей разломной тектоники и сейсмичности.

В рамках изучения геоэкологических проблем нефтяного комплекса Восточного Предкавказья выполнен цикл исследований по анализу техногенной сейсмичности, обусловленной разработкой нефтяных месторождений; исследованы вопросы деформации нефтеносных горизонтов и земной поверхности в результате добычи нефти и газа, разработаны рекомендации по мониторингу и снижению негативного воздействия на природную среду. Сделаны выводы, что землетрясения на нефтяных месторождениях носят преимущественно триггерный характер. Разработан проект создания геодинамического полигона на грозненских нефтяных месторождениях.

**Геоэкологические проблемы нефтегазового комплекса**

Проведен цикл исследований по оценке загрязнения природной среды в результате пожаров и аварий на нефтяных месторождений в период военных действий. За последнее десятилетие на территории Чеченской Республики произошло около двухсот аварий на нефтяных скважинах, разрабатывающих мезозойские залежи. За период 1999–2003 гг. в открытом фонтанировании находились 148 скважин 16 нефтяных месторождений. В результате исследований была разработана методика оценки воздействия открыто

фонтанирующих нефтяных скважин (ОФНС) на природную среду. На основе данной методики выполнены:

– оценка количественных параметров техногенного воздействия ОФНС на территории нефтяных месторождений;

– количественная оценка вредных веществ, выброшенных в атмосферу при ОФНС с горением нефти;

– оценка потерь углеводородов вследствие ОФНС;

– районирования территории нефтедобывающего комплекса по степени и характеру углеводородного загрязнения при ОФНС;

– анализ динамики, механизмов и разработка моделей развития углеводородных ореолов загрязнения;

– анализ самовосстановления растительного покрова на нефтезагрязненных участках в окрестностях ОФНС.

Проведены комплексные полевые исследования по выявлению и оконтуриванию площадей техногенных подземных скоплений нефтепродуктов в районе г. Грозный включающие георадарную, газовую и геохимическую съёмки, бурение оценочных скважин с использованием материалов космической съёмки. По результатам исследований выявлены и оконтурены 4 техногенных залежей с общим обьемом УВ до 2 млн т.

**Развитие ВИЭ**

Развитие возобновляемых и нетрадиционных источников энергии является одним из факторов устойчивого развития региона. В рамках исследований разработке и ежегодной актуализации Программы развития энергетики Чеченской Республики на 2011–2030 гг., выполнены исследования по оценке потенциала солнечной, ветровой и геотермальной энергии территории Чеченской Республики, составлены карты потенциала различных видов ВИЭ. Разработано научно-техническое и экономическое обоснование создания ВИЭ. Данная программа в настоящее время успешно реализуется, запущена в эксплуатацию солнечная электростанция, на стадии строительства – ветровая и вторая солнечная электростанции.

**Карбоновый полигон**

В 2021 г. на территории Чеченской Республики был заложен Карбоновый полигон на базе ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова. В качестве научного руководителя нами была разработана концепция, структура и научная программа развития полигона, официальное открытие которого состоится 12 мая с.г. В настоящее время на эталонных участках полигона выполнены первые исследования по изучению ландшафтов, биоразнообразия, анализу почв и пр. В рамках климатических исследований на полигоне создана карбоновая ферма общей площадью 24 га, на ней в 2021 г. посажены саженцы 4-х видов (тополь, шелковица, липа, ива), с апреля с.г. планируется мониторинг эмиссии и секвестрации парниковых газов. Проведены первые исследования по изучению почв, загрязненных углеводородами и геотермальными водами. В рамках исследований по изучению изменчивости агроклиматических условий Северного Кавказа в связи с глобальными изменениями климата в 2021 г. получены следующие результаты:

– Создана база метеоданных с 1961 по 2020 гг. по 27 репрезентативным метеостанциям Северного Кавказа, выполнена статистическая обработка, определены показатели и индексы, характеризующих агроклиматические условия, составлена серия

карт современных агроклиматических условий и динамики ландшафтов региона с использованием ГИС-технологий.

– Для различных ландшафтных зон Северного Кавказа выполнен анализ изменений январской и июльской температур в период 1961–2020 гг., который показывает устойчивый в регионе тренд повышения температуры на 1,5–2,0 °С для всех типов ландшафтов.

– Выполнен анализ климатических изменений аридных (полупустынных и пустынных) ландшафтов Северного Кавказа.

В рамках исследований по изучению влияния промышленных предприятий республики на изменения климата разработаны предложения по технологии полного цикла улавливания и утилизации выбросов $CO_2$ в скважины для Чеченского цемзавода и Грозненской ТЭС.

# ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НООСФЕРЫ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Е.М. Коробова*

ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского» РАН, *г. Москва*
korobova@gokhi.ru

Качество и продолжительность жизни любого организма является результатом химического взаимодействия живого вещества со средой своего обитания. При этом процессы, его характеризующие – процессы биогеохимические. Именно поэтому эколого-геохимические проблемы современности, среди которых наиболее острые и актуальные находятся на стыке медицины с геохимией, могут быть решены только в рамках теории и методологии этой науки.

Первичная (ненарушенная человеком) биосфера представляла собой идеально сбалансированную и саморегулируемую систему, в которой каждый существовавший вид занимал идеально соответствующую ему экологическую нишу. Поскольку живое вещество всегда заполняло все доступное пространство с максимально возможной плотностью, в такой обстановке конкуренция за ресурсы максимальна и малейшее заболевание означало быструю гибелью, а малейшее преимущество, например, появление содержащего никель, фермента, способного увеличить нервную проводимость, резко увеличивало шансы вида на выживание. Соответственно, дефицит или избыток любого из 67 доказанных элементов–биофилов автоматически должен был означать и быстрые изменения в структуре существовавших биоценозов. Таким образом, ненарушенная биосфера на всех стадиях эволюции представляла собой предельно оптимизированную эколого-геохимическую систему, благодаря чему каждая особь постоянно функционировала на пике своих физиологических возможностей.

Сравнительно недавно в ходе эволюции биосферы произошел качественный скачок, один из множества видов приобрел разум в качестве решающего конкурентного преимущества. Изменение было столь значительным, что биосфера геологически почти мгновенно перешла на новый уровень развития, в ходе которого *Homo sapiens* начал постоянно и повсеместно трансформировать ее исключительно в своих интересах, не перестав, однако, быть зависимой частью уже качественно новой системы – ноосферы.

Став «хозяином» планеты человек был вынужден заплатить за это определенную цену, выразившуюся не только в трансформации климата, но и в появлении ряда эндемических заболеваний геохимической природы. Сначала это были болезни природного генезиса, возникающие по мере освоения новых территорий, такие как цинга, зоб или уровская болезнь, а затем обнаружилась и большая группа заболеваний, обусловленных техногенным загрязнением воды и почвы ртутью, хромом, мышьяком, таллием и множеством других (в том числе и органических) токсикантов.

Биогеохимические исследования специфики пространственного распространения эндемических заболеваний позволили не только установить причину, но и найти простые и эффективные способы борьбы с ними, поскольку многие из них оказались следствием длительного обитания именно в неоптимальных геохимических условиях: цинга оказалась следствием нехватки витамина С, массово выявляемый зоб предотвращался приемом йодсодержащих препаратов и т.п. Таким образом, проблема ликвидации данного класса заболеваний решается путем создания геохимически оптимальных условий обитания.

Поставленная задача относительно проста в постановке, но очень сложна в решении, которое предполагает, во-первых, знание геохимических параметров самого этого оптимума, а, во-вторых, требует точного представления о пространственной эколого-геохимической специфике изучаемой территории. Задача поиска оптимума может решаться двумя путями: или изучением геохимических параметров в центрах происхождения исследуемых видов, или нахождением экстремума кривой В.В. Ковальского (1974) применительно тем же видам или целым биоценозам.

Проблема картирования природного фона также имеет несколько путей решения, но наиболее рациональный и быстрый состоит в использовании крупномасштабных почвенных карт, что позволяет обеспечить высокий уровень точности и детальности. Следует помнить, что на здоровье значимо воздействует и техногенное загрязнение, которое проявляет себя в виде относительно тонкого слоя элементов и соединений, наложенного на поверхность существовавшего природного фона. Наши исследования показали, что этот слой имеет специфическую пространственную структуру, он полицентричен, и представляет собой набор аномалий моноцентрического типа, хорошо поддающихся идентификации и картированию. Таким образом, геохимическая структура ноосферы двуслойна, в силу чего может быть воспроизведена методом оверлейного наложения цифровых картографических поверхностей, что, в свою очередь, открывает принципиальную возможность построения карт риска возникновения эндемических заболеваний. Важно, что данный подход универсален и открывает возможность построения карт риска любых заболеваний геохимической природы.

Не менее важную и нерешенную проблему представляет построение детальных карт заболеваемости. Сложность здесь состоит и в трудности получения медицинской информации, и в создании подходов к максимально детальному картографическому отображению вероятности реализации редких событий.

Полученный нами опыт показал, что все названные проблемы реально решаемы, а полученные результаты представляют собой реализацию именно дедуктивного подхода к решению широкого класса задач ликвидации заболеваний эндемической природы, практическая реализация которого несомненно будет способствовать повышению эффективности соответствующих мероприятий не только в России, но и в мире.

Описанные биогеохимические исследования на данный момент, во-первых, не имеют полных аналогов в мире, а, во-вторых, чрезвычайно перспективны еще и потому, что полученные предварительные результаты обнаруживают наличие существенных признаков эндемичности (пространственной приуроченности) таких «человеческих» заболеваний, как рак, диабет, артроз и др. Проверке подлежит и специфика протекания большинства обычных (соматических) заболеваний, наблюдаемых в неблагоприятных эколого-геохимических условиях. Таким образом, названные проблемы можно без преувеличения назвать глобальными хотя бы потому, что их решение может способствовать существенному росту продолжительности и улучшению качества жизни человека в масштабах всей геохимически весьма неоднородной планеты.

# ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*С.В. Лукичев*

«Горный институт ФГБУН ФИЦ Кольский научный центр РАН», *г. Апатиты*
Lu24@goi.kolasc.net.ru

Процесс цифровой трансформации горнодобывающей промышленности носит эволюционный характер и начался с появления на крупных предприятиях, в проектных и научных организациях электронных вычислительных машин (ЭВМ). На том начальном этапе решение задач горной технологии с использованием ЭВМ носило в основном демонстрационный характер, было слабо интегрировано в рабочий процесс и не имело практически никакой экономической значимости. Но важным результатом того начального этапа явилось понимание необходимости комплексного подхода к решению задач горной технологии и как следствие – возникновение центров разработки специализированного программного обеспечения.

Начиная с того момента можно выделить 4 этапа цифровой трансформации горнодобывающей промышленности – те, что уже пройдены и те, что ещё предстоит пройти:

1. **Автоматизация решения отдельных задач**. Этап характерен появлением большого количества компьютерных программ, не связанных между собой и решающих отдельные задачи горного производства. Результат – локальная автоматизация рабочих процессов.

2. **Комплексное решение групп задач**. Формируются системы, решающие тематически объединённые группы задач. Результат – автоматизация рабочих процессов в отдельных цифровых пространствах.

3. **Цифровая технология инженерного обеспечения горных работ**. Результат – функционирование автоматизированных рабочих мест специалистов в едином цифровом пространстве. Реализация этого этапа означает достижение уровня ***Цифрового рудника*** – *способа представления объектов и процессов горной технологии в виде цифровых моделей, описывающих свойства и поведение реальных объектов в едином цифровом пространстве предприятия*.

4. **Цифровой двойник – *Цифровой рудник***, имеющий коммуникационные связи в on-line режиме между реальными единицами оборудования и их цифровыми моделями**.** Результат – малолюдная технология добычи полезного ископаемого на основе цифрового управления производством.

Как и для любого начального этапа решения сложной научно-технической проблемы наблюдалась дифференциация общей проблематики на отдельные области. Можно выделить три наиболее значимых:

1) Горно-геологические информационные системы (ГГИС), обеспечивающие автоматизацию решения Геологических, Маркшейдерских и Технологических задач.

2) Системы диспетчеризации, предлагающие программно-технические комплексы для решения задач в области управления работой горнотранспортного оборудования.

3) Системы обеспечения геомеханической безопасности, построенные на программах расчёта напряжённо-деформированного состояния массива и системах мониторинга его состояния в границах ведения горных работ.

Если оценивать, на каком этапе трансформации находятся отечественные горнодобывающие предприятия, то в основном – это 2-й этап. При этом некоторые находятся в стадии перехода от 1-го этапа ко 2-му, а наиболее продвинутые предприятия уже двигаются в направлении 3-го этапа.

Важным элементом цифровой технологии является виртуальное пространство, за формирование которого отвечают программные продукты класса ГГИС. На сегодня это узкий круг программных продуктов, представленных на российском рынке в основном импортными разработками.

Одним из немногих российских программных продуктов этого класса является ГГИС MINEFRAME, разрабатываемая в Горного института КНЦ РАН с 1997 г. Существенным отличием MINEFRAME от других ГГИС является представление цифровой модели объекта в виде единой структуры, объединяющей её векторные, каркасные и блочные элементы. Наличие такой структуры обеспечивает сохранение целостности данных и возможность работы с десятками тысяч моделей.

На сегодня MINEFRAME – это полнофункциональная ГГИС, обеспечивающая формирование единого цифрового пространства горнодобывающего предприятия и автоматизацию решения в этом виртуальном пространстве геологических, маркшейдерских и технологических задач. Для реализации этого функционала разработаны 4 программы, обеспечивающие:

− Формирование базы данных (БД) геологического опробования с возможностью обработки и графического представления данных.

− Трёхмерное моделирование объектов геологической среды и горной технологии, управление загрузкой и выгрузкой моделей из БД. В этой же среде с использованием моделей осуществляется решение задач горной технологии, а также подготовка технологической документации.

− Работу с БД технологического оборудования и расходных материалов, что позволяет делать оценку затрат на выполнение горных работ с привязкой затрат к моделируемым объектам.

− Организацию коллективной работы специалистов с БД в локальной вычислительной сети. Наличие инструментов задания уровня доступа к различным категориям объектов, ведения журнала их изменений и инструментов восстановления объектов повышает сохранность цифровой информации.

На сегодня ГГИС MINEFRAME содержит свыше 300 цифровых инструментов, предназначенных для комплексного решения задач горной технологии. С использованием этих инструментов формируются рабочие места специалистов (с различным функциональным наполнением): геологов, маркшейдеров, технологов (открытые и подземные горные работы).

Характерной чертой 3-его этапа цифровой трансформации горнодобывающей промышленности является формирование единого цифрового пространства предприятия. Возможны два способа его формирования: 1-ый – на основе интеграционной платформы; 2-ой – на основе или цифровой платформы. Наиболее перспективной с точки зрения создания «бесшовной» технологии является цифровая платформа, поэтому нами начаты работы по трансформации ГГИС MINEFRAME в этом направлении. Наличие такой платформы позволит за счёт предоставления доступа внешним разработчикам

к функционалу ГГИС ускорить процесс разработки инструментов и их интеграции в цифровую технологию.

Конечной целью цифровой трансформации горнодобывающего предприятия является **Цифровой двойник**. Но горное предприятие осуществляет, как правило, не только добычу полезного ископаемого, но и его обогащение, поэтому актуальной задачей представляется создание Цифрового двойника горно-обогатительного комплекса. В Горном институте КНЦ РАН эта работа ведётся в последовательности от создания цифровых двойников отдельных единиц обогатительных аппаратов к созданию двойников технологических схем обогащения. В качестве платформы для создания цифровых двойников используется SCADA – система.

# ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫНА ПРИМЕРЕ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

*Д.В. Макаров*

«Институт проблем промышленной экологии Севера
ФГБУН ФИЦ Кольский научный центр РАН», *г. Апатиты*
d.makarov@ksc.ru

На примере Мурманской области, одного из крупнейших горнодобывающих регионов России, исследованы экономические и экологические проблемы, возникающие при хранении отходов добычи и переработки полезных ископаемых [1]. В процессе хранения происходят изменения состава и свойств минералов вследствие гипергенеза, наблюдается дифференциация вещества в объеме за счет поверхностного сноса, химического выветривания и суффозионных процессов. При этом меняются физико-химические свойства поверхности большинства даже устойчивых минералов. Показано, что отходы наносят ущерб окружающей среде, в том числе после истощения и прекращения эксплуатации месторождений. При хранении отходов происходит существенное изменение технологических свойств извлекаемых полезных ископаемых. Как следствие, снижается потенциальная стоимость отходов как минерального ресурса. Проанализировано несовершенство нормативно-правовой базы, приводящие к повышению удельных затрат на извлечение ценных компонентов и снижению рентабельности переработки отходов. Предложены возможные поправки к российскому законодательству [2].

Ранжированы по степени потенциальной экологической опасности некондиционные медно-никелевые руды и техногенные минеральные образования: вскрышные породы, хвосты обогащения и отвальные шлаки, расположенные на территории Мурманской области [3]. Установлены критерии пригодности природного и техногенного медно-никелевого сырья к переработке геотехнологическими методами.

Рассмотрены особенности и технологические приемы для интенсификации кучного выщелачивания цветных металлов из сульфидных руд и техногенных отходов в условиях Арктики [4]. Показаны возможности снижения эксплуатационных расходов и повышения рентабельности процесса при переработке некондиционного медно-никелевого сырья в суровых климатических условиях [5].

Разработаны прогрессивные методы переработки некондиционных сульфидных рудных материалов с применением сульфата аммония [6]. Низкотемпературный обжиг с последующим водным выщелачиванием спека является перспективным энергоэффективным и экологически чистым процессом, при реализации которого резко снижаются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, а сульфат аммония может быть регенерирован.

Одним из перспективных методов защиты и очистки природных водоемов и сточных вод от загрязнения является применение геохимических барьеров. Предложена классификация геохимических барьеров по их происхождению, способам получения, применения и направлениям использования [7]. Обосновано использование карбонатных пород и серпентинитов в качестве искусственных геохимических барьеров для очистки сточных и природных вод и осаждения ценных металлов [8].

С учетом огромных объемов отходов горных предприятий, основным их потребителем может быть отрасль строительных материалов как наиболее ресурсоемкая. Разработан способ повышения морозостойкости керамических строительных материалов полусухого прессования на основе неспекающегося малопластичного техногенного сырья – отходов обогащения медно-никелевых, апатит-нефелиновых и железных руд [9]. Научно обоснован состав шихты с использованием отвальных шлаков цветной металлургии для получения клинкерных керамических материалов [10]. Компонентами шихт получаемых материалов являются исключительно отходы: хвосты обогащения и металлургические шлаки, первичное сырье не используется. На основе отходов обогащения апатит-нефелиновых руд получен теплоизоляционный пеноматериал, который может быть рекомендован для использования при строительстве и реконструкции промышленных и гражданских зданий [11].

Таким образом, предложенные методы позволяют минимизировать воздействия на окружающую среду отходов горно-металлургического комплекса и увеличить полноту использования минерального сырья.


1. *Nevskaya M.A., Seleznev S.G., Masloboev V.A., Klyuchnikova E.M., Makarov D.V.* Environmental and business challenges presented by mining and mineral processing waste in the Russian Federation // Minerals. 2019. V.9. 445; doi:10.3390/min9070445

2. *Маслобоев В.А., Макаров Д.В., Ключникова Е.М.* Устойчивое развитие горнопромышленного комплекса Мурманской области: минимизация техногенных воздействий на окружающую среду // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т.13. №2. С.188–200.

3. *Светлов А.В., Припачкин П.В., Маслобоев В.А., Макаров Д.В.* Классификация некондиционных медно-никелевых руд и техногенных минеральных образований по их экологической опасности и пригодности к гидрометаллургической переработке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. Т.56. №2. С.128–136.

4. *Masloboev V.A., Seleznev S.G., Svetlov A.V., Makarov D.V.* Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: perspectives and challenges // Minerals. 2018. V.8. 436; doi:10.3390/min8100436

5. *Goryachev A., Svetlov A., Kompanchenko A., Makarov D.* Sulfuric acid granulation of copper-nickel ore tailings: Leaching of copper and nickel in the presence of sulfide oxidation activators // Minerals. 2022. V.12. 129; doi:0.3390/min12020129

6. Goryachev A.A., Chernousenko E.V., Potapov S.S., Tsvetov N.S., Makarov D.V. A Study of the feasibility of using ammonium sulfate in copper–nickel ore processing // Metals. 2021. V.11. 422; doi:10.3390/met11030422

7. *Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D., Nesterov D., Bajurova Yu., Svetlov A., Men'shikov Yu.* Geochemical barriers for environmental protection and of recovery of nonferrous metals // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2014. V.49. No.12. P.1409–1415.

8. *Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D., Mazukhina S., Nesterov D., Men'shikov Yu.* Artificial geochemical barriers for additional recovery of non-ferrous metals and reduction of ecological hazard from the mining industry waste // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2011. V.46. N.13. P.1579–1587.

9. *Suvorova O., Kumarova V., Nekipelov D., Selivanova E., Makarov D., Masloboev V.* Construction ceramics from ore dressing waste in Murmansk region, Russia // Construction and Building Materials. 2017. V.153. P.783–789.

10. *Suvorova O.V., Selivanova E.A., Mikhailova J.A., Masloboev V.A., Makarov D.V.* Ceramic products from mining and metallurgical waste // Applied Sciences. 2020. V.10. No10. 3515; doi:10.3390/app10103515

11. *Манакова Н.К., Суворова О.В., Макаров Д.В.* Влияние минеральных добавок на структуру и свойства теплоизоляционных материалов на основе кремнеземсодержащего сырья // Стекло и керамика. 2021. №8. С.35–40.

# НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СУХОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУД ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

*А.И. Матвеев*
Институт гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов Севера РАН
ФГБУН ФИЦ «Якутский научныйцентр СО РАН», *г. Якутск*

Одним из перспективных направлений, проводимых нами исследований, является разработка научно-экспериментальных основ сухого обогащения различного рудного минерального сырья. Актуальность данного направления связана с высокой капиталоёмкостью, прежде всего, процессов рудоподготовки и расходом технической воды в процессах переработки обогащения полезных ископаемых (4–5 $м^3$/т и более), что в условиях Российского Севера чревато высокой себестоимостью и повышенной экологической нагрузкой на окружающую среду, которое подтверждается опытом эксплуатации обогатительных фабрик на территории Якутии.

Нами найдены условия существенной интенсификации процессов ударного дробления и измельчения, которые заключаются в возможности обеспечения многократных динамических воздействий на кусковые геоматериалы в рабочей зоне разрушения, реализуемых в новых аппаратах, в которых обусловлена мгновенная объемная передача напряжений по механическим связям по всему объему материала, и в конечном счете, приводящее к его фатальному разрушению в режиме дезинтеграции с опережающим избирательным раскрытием минеральных форм, в том числе, полезных компонентов [1]. Подход полностью соответствует золотому правилу обогатителей – «не дробить ничего лишнего».

Первоначальный результат получен при испытании различных рудных геоматериалов в дробилке комбинированного ударного действия ДКД-300, одной из первых наших разработок, в том числе для алмазосодержащих кимберлитов трубки «Зарница», где наряду с высокой степенью дробления получены результаты по высокой сохранности кристаллов алмазов по сравнению с мокрой мельницей самоизмельчения типа «Каскад» (в 3 раза) [2]. В части количественного определения эффекта дезинтеграции обоснована методика определения степени дезинтеграции геоматериалов. Методика предполагает по гранулометрическому составу продуктов дробления идентификацию двух процессов рудоподготовки: дезинтеграцию и собственно механическое разрушение [3]. Методика основана на вычленении из общего гранулометрического состава продуктов дробления доли, области их преимущественного накопления (моды), описываемых в виде логнормального распределения, зависящего от энергии механического воздействия и отвечающего за процесс непосредственного механического разрушения геоматериала. Степень дезинтеграции, наряду со степенью дробления, является важной технологической характеристикой, как объекта рудоподготовки минерального сырья, так и аппаратов дробления и измельчения, независимо от используемого способа и типоразмера.

Установлены закономерности дезинтеграции горных пород при интенсивных механических воздействиях, разработаны способы разрушения кусковых геоматериалов многократными динамическими воздействиями в режиме дезинтеграции, избирательного опережающего раскрытия мономинеральных полезных компонентов, что послужило для разработки ряда перспективных аппаратов рудоподготовки: сухого дробления и измельчения. В этой части защищено наибольшее количество патентов – 34.

В части сухого обогащения нами разработаны основы разделения минералов из измельченного материала по миграционной способности в искусственно создаваемом

минерально-воздушном потоке, что является существенным развитием в области пневматических методов обогащения, конкретно для обогащения минералов высокой и средней плотности в искусственно создаваемых аэродинамических потоках, в частности, в работе с винтовой аэродинамической трубой [4].

Разработаны и апробированы высокоэффективные опытные образцы горно-обогатительного оборудования: дробилки многократного динамического воздействия РД-МДВ-900, ДКД-300, центробежные измельчители ЦМВУ-800 и ВЦИ-1500, пневмосепараторы ПОС-2000 и ВПС-500. Разработаны принципиальные конструкции и проектируется ряд новых аппаратов рудоподготовки и пневматического обогащения. Установлена самая высокая степень дробления для новой высокопроизводительной дробилки РД-МДВ-900 со значением 12. Показана эффективность апробации автономного комплекса сухого обогащения с новыми безопасными стандартами экологии по переработке золотосодержащих руд, позволяющих полностью раскрыть и извлечь свободное золото крупностью от 10000 до 100 микрон. В частности, это подтвердилось на примере переработки золотосодержащих руд ряда месторождений: Нежданинского, Дуэтского, Сарылахского, Малтан, Нагорное, Якутское, Вьюн, Малотарынского (Якутия), Гурбей (Иркутская область) [5–6].


1. *Львов Е.С., Матвеев А.И.* Изучение формирования гранулометрического состава и раскрытия минералов при дроблении руд с использованием дробилки многократного динамического действия ДКД-300 // Горн. информ. - аналит. бюл. 2014. № 10. С. 112–116.

2. *Матвеев А.И., Львов Е.С., Осипов Д.А.* Обоснование применения дробилки комбинированного ударного действия ДКД-300 в схеме сухого обогащения кимберлитовых руд трубки «Зарница» // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. Ископаемых. 2013. № 4. С. 107–115.

3. *Матвеев А.И. Львов Е.С.* Разработка методики определения степени дезинтеграции геоматериалов в процессе многократного ударного дробления // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. Ископаемых. 2020. № 2. С.137–143.

4. *Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Никифорова Л.В, Яковлев Б.В.* Моделирование движения частиц в винтовом пневмосепараторе // Горн. информ. аналит. бюл. 2014. № 10. С. 172–178.

5. *Матвеев А.И., Львов Е.С., Заикина А.В.* Особенности механического разрушения золото-содержащих руд месторождения Гурбей ударными динамическими воздействиями // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. Ископаемых. 2021. № 2. С. 141–151.

6. *Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Львов Е.С, Гаврильев Д.М., Осипов Д.А., Слепцова Е.С.* Возможности внедрения сухой технологии предварительного обогащения золотосодержащих руд на примере месторождения Гурбей / Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы VII Междунар. науч. конф., г. Хабаровск, 25-27 сент. 2018 г. Хабаровск, 2018 [электрон.ресурс].

# ОТ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИГНАТУР АНТРОПОЦЕНА ДО ЭКОАДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

*И.В. Перминова*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, *г. Москва*
iperminova@gmail.com

Органическое вещество (ОВ) на Земле, как и в живом организме, вовлечено в непрерывные процессы образования (анаболизма) и распада (катаболизма), которым на глобальном уровне соответствуют фотосинтез и гумификация Их совокупность представляет собой систему глобального метаболизма. В процессе гумификации ежегодно участвует 20 Гт органического углерода ($C_{орг}$), что ставит его на второе месте после фотосинтеза (60 Гт $C_{орг}$ в год) [1]. Продуктами гумификации являются гуминовые вещества (ГВ) низкометаморфизованных каустобиолитов (выветрелый бурый уголь, торф, сапропель), почв, донных отложений и многолетнемерзлых пород, а так же растворенное органическое вещество (РОВ) природных вод. Содержание ГВ в выветрелых окисленных углях достигает до 90%, в торфе – до 40%. Гуминовые системы составляют органическую матрицу почвенных и водных сред, Тем самым они мы представляют собой экосистемные метаболиты, несущие молекулярный отпечаток – сигнатуру – современных климатических, геологических и географических условий их образования, сформированных под воздействием деятельности человека, объединяемых под термином «антропоцен» [2]. Изучение и систематизации молекулярного состава гуминовых систем является важнейшим условием создания современной экосистемной метаболомики – молекулярной диагностики глобальных процессов трансформации ОВ.

Оптимальным способом решения указанной проблемы является применение масс-спектрометрии ионно-циклотронного резонанса с преобразованием Фурье (МС ИЦР ПФ), обладающей беспрецедентно высоким разрешением, что позволяет различать в составе гуминовых систем миллионы атомов углерода с различным химическим окружением [3]. Нами впервые был разработан высокоэффективный алгоритм анализа и свертки информационно насыщенных масс спектров для гуминовых систем [4], который лег в основу многих ПО. Развитием этих работ стало проведение международного межлабораторного эксперимента по анализу 6 образцов ГВ на 5 масс-спектрометрах. Было показано ограничение популярного подхода к оценке подобия данных о молекулярном составе ГВ по общим и уникальным формулам и продемонстрировали преимущества предложенной нами свертки данных путем интегрирования плотности заселенности диаграммы Ван Кревелена [5].

Разработанные подходы позволили установить резкую смену молекулярной сигнатуры РОВ реки Обь после впадения реки Иртыш с восстановленного (лигнины) на окисленный (таннины) ароматический комплекс [6]. При этом для бассейна реки Колыма показано доминирование сигнатур алифатического ОВ с высоким вкладом азотсодержащих структур, характерного для многолетнемерзлых пород. Указанные закономерности были подтверждены методом спектроскопии ПМР при изучении РОВ высоких и средних широт. Тем самым показана диагностическая значимость гуминовых систем для мониторинга глобальных климатических процессов.

Важной проблемой геоэкологии является восстановление функций жизнеобеспечения загрязненных и нарушенных экосистем в результате антропогенного

воздействия. В этом аспекте особое значение имеет изучение природных процессов самоочищения, самоорганизации и самовосстановления, в которых ключевая роль принадлежит гуминовым системам. Полифункциональность и амфифильность супрамолекулярного ансамбля гуминовых систем определяет их способность вступать во все типы химических взаимодействий. Они могут эффективно связывать как органические экотоксиканты, так и токсичные металлы, снижая их токсичность. Они могут образовывать геохимические барьеры, препятствуя миграции экотоксикантов Присутствие гуминовых макролигандов ингибирует формирование кристаллических оксидов железа и играет ключевую роль для синтеза биодоступных наночастиц оксогидроксидов железа. Они определяют гидрофильно-гидрофобный баланс почвенных частиц и влияют на водопрочность почвенных агрегатов.

Поэтому весьма актуальной проблемой является воссоздание указанных природных механизмов в химикатах, материалах и процессах для разработки экоадаптивных технологий управления качеством и рекультивации нарушенных сред [5]. Перспективность данного направления подтверждается результатами наших многолетних изысканий. Впервые статистически обосновано, что содержание ароматического углерода определяет детоксицирующую способность гуминовых систем в отношении гидрофобных соединений. Это открывает возможности как для прогноза защитного потенциала геосред, так и для направленного применения гуминовых реагентов для рекультивации [7]. Убедительно показана возможность формирования геохимического барьера для очистки подземных вод от загрязнения путем закачки гуминовых инъекционных материалов через куст скважин в водоносный горизонт [8]. Впервые предложены подходы к восстановлению механически нарушенных почвенных сред путем применения гуминовых мелиорантов, способствующих самосборке водопрочных почвенных агрегатов. Предложено использовать твердые стабилизаторы для создания нового поколения диспергентов и промывных агентов на основе эмульсий Пикеринга для очистки нефтезагрязненных сред. Указанный подход был использован для технологии in situ очистки грунтов от загрязнения дизельным топливом с применением гуминово-бентонитовых составов, которая получила положительное заключение Государственной экологической экспертизы Росприроднадзора от 03.03.2022 (предназначена для очистки загрязненных грунтов в районе г. Норильск).

Полученные знания могут быть использованы при решении важнейшей проблемы геоэкологии, связанной с добычей и сжиганием окисленного бурого угля, путем его глубокой переработки с целью получения гуминовых мелиорантов и других продуктов и их направленного применения для экоадаптивных технологий жизнеобеспечения.

1. *Hedges, J.I., Oades, J.M.* Comparative organic geochemistries of soils and marine sediments // Org. Geochem., 1997, V. 27, P. 319-361.

2. *Crutzen, P.* Geology of mankind // Nature, 2002. №415, P. C. 23.

3. *Hertkorn, N., Frommberger, M., Witt, M., et al.* Natural organic matter and the event horizon of mass spectrometry // Anal. Chem. 2009. V. 80. P. 8908–8019.

4. *Kunenkov, E.V., Kononikhin, A.S., Perminova I.V.* et al. Total mass difference statistics algorithm // Anal. Chem., 2009, V. 81. P. 10106–10115.

5. *Perminova, I.V.* From green chemistry and nature-like technologies towards ecoadaptive chemistry and technology // Pure Appl. Chem., 2019 V. 91, P. 851–864.

6. *Perminova, I. V., Shirshin, E. A., Zherebker, A., et al.* Signatures of molecular unification and progressive oxidation unfold in dissolved organic matter of the Ob-Irtysh River system along its path to the Arctic ocean // Sci. Rep. 2019. V. 9. № 19487.

7. *Perminova, I. V., Garcia-Mina, J.-M., Podgorski, D. C.,* et al. Humic substances and living systems: impact on environmental and human health // Env. Res. 2021. V. 194 №110726

8. *Perminova, I., Hatfield, K.* Remediation chemistry of humic substances: Theory and implications for technology // In: Use of humic substances to remediate polluted environments. Eds: Perminova, I.V., Hatfield K., Hertkorn N. NATO Science Series, 2005. V. 52, P. 3–36

# ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

*А.И. Семячков*

ФГБУН «Институт экономики УрО РАН», *Екатеринбург*
a.semyachkov@mail.ru

Горнопромышленные комплексы, осваивающие месторождения полезных ископаемых, создают основной экономический потенциал государства. С другой стороны они являются объектами негативного воздействия на окружающую среду. Поэтому необходимы геоэкологические исследования горнопромышленных комплексов (ГПК) на основе мониторинга и оценки их состояния с целью разработки мероприятий для снижения негативного воздействия на окружающую среду [1].

Разработана двухуровневая система экологического мониторинга, включающая детальный и локальный уровень и позволяющая решать проблемы защиты окружающей среды на территориях горнопромышленных комплексов, разработаны мероприятия и выданы рекомендации по охране окружающей среды и совершенствованию системы мониторинга на данных территориях. Разработана технология ведения экологического мониторинга ГПК, которая включает в себя ведение сопряженного мониторинга всех сред в точках опробования. Это позволяет оценить взаимосвязь загрязнения окружающей среды и миграцию элементов по средам [2, 3].

Трансформации окружающей среды от воздействия ГПК обеспечивается учётом распределения компонентов загрязнителей в полном цикле технологического передела руд. Критерием количественной оценки воздействия на окружающую среду ГПК впервые предложен технолого-геохимический баланс рудных и попутных элементов в полном цикле переработки минерального сырья Выявлены закономерности фонового распределения загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды Среднего Урала, связанные с неоднородностью распределения геологических и рудных формаций. Разработана и доведена до практической реализации методология комплексного прогнозирования, нормирования и оценки воздействия ГПК на окружающую среду. Практическая реализация подтвердила эффективность и унифицированность разработанной методологии и показала возможности её применения для других категорий объектов [4,5].

Теоретические основы оценки воздействия техногенно-минеральных образований (ТМО), как составной части ГПК, на окружающую природную среду и теоретические основы экономической оценки ТМО рассмотрены совместно. Характеризуются методические принципы воздействия ТМО на окружающую среду и технология стратегической оценки ресурсов. В оценке ТМО присутствует учет динамики изменения экономического риска, учитываются факторы экономического и экологического рисков, связанных с наличием ТМО, проанализировано существо этих факторов. Доведена до практической реализации методология оценки воздействия ГПК на окружающую среду [6].

С рассмотренных позиций «Геоэкология» представляется как наука о воздействии литосферы на биосферу с учетом экономической деятельности человека.

1. *Семячков А.И.* Методология оценка техногенной трансформации окружающей среды под воздействием горно-металлургических комплексов. Научное издание / Под редакцией академика РАН А.И. Татаркина – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2007. 348 с.

2. *Семячков А.И., Парфёнова Л.П., Почечун В.А., Копёнкина О.А*. Теория и практика ведения локального экологического мониторинга окружающей среды меднорудных горно-металлургических комплексов. / Под ред. А.И. Семячкова . – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2008. – с.

3. *Семячков А.И., Фоминых А.А., Почечун В.А.* Мониторинг и защита окружающей среды железорудных горно-металлургических комплексов / Под ред. О.А. Романовой Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2008. 243 с.

4. *Семячков А.И., Славиковская Ю.О., Дребенштедт К.* Эколого-экономические аспекты деятельности предприятий горной промышленности. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2013. -252 с.

5. *Семячков А.И., Почечун В.А.* Системный подход в геоэкологических исследованиях горнопромышленных комплексов Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН. 2016. 292 с.

6. Семячков А.И., Балашенко В.В., Косолапов О.В. Эколого-экономическая оценка техногенно-минеральных образований / Под ред. академика РАН А.И. Татаркина. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2009. – 196 с.

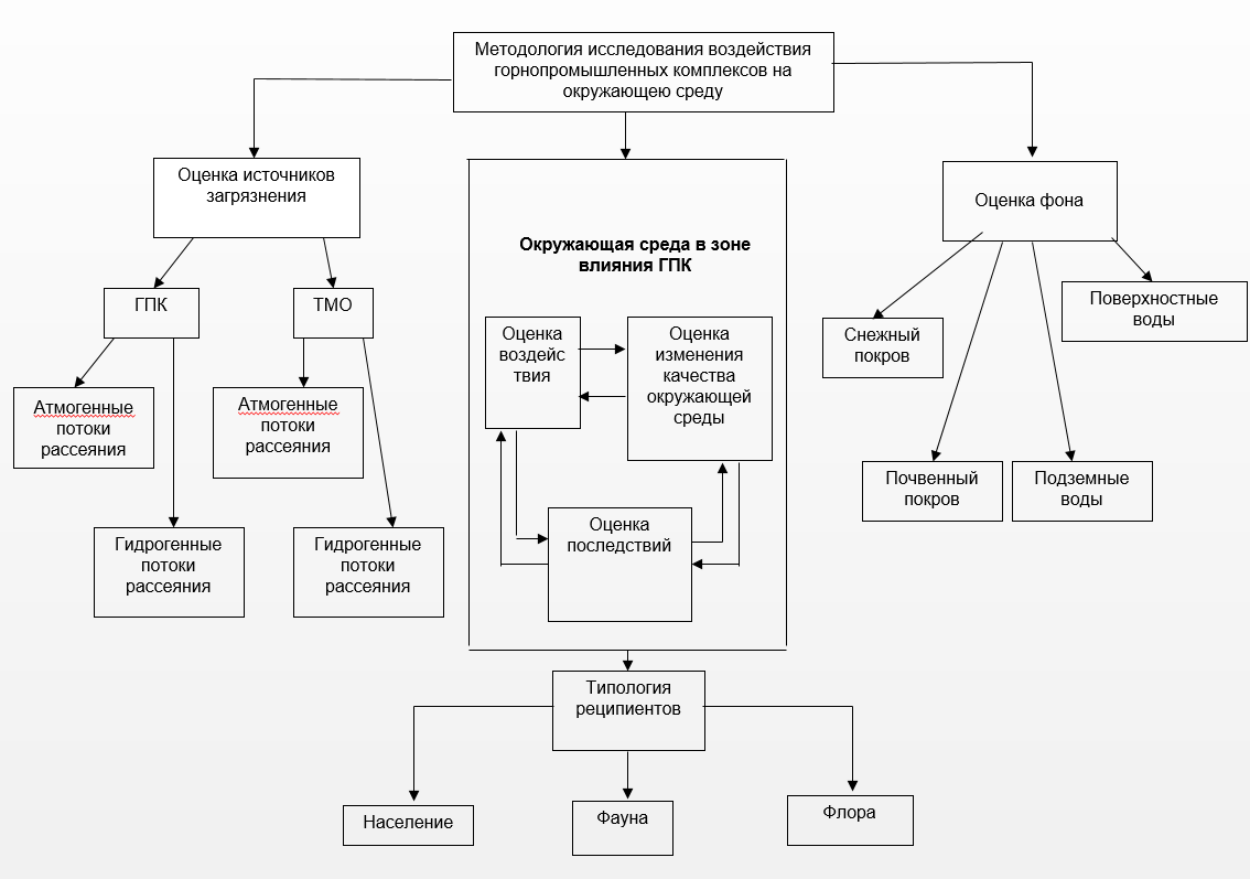



Рисунок. Методология геоэкологической оценки воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду.

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ

*В.Н. Татаринов*

ФГБУН «Геофизический центр РАН», *г. Москва*
v.tatarinov@gcras.ru

За период интенсивного развития атомной промышленности на территории России был накоплен огромный объем радиоактивных отходов (РАО) активностью более $5{,}9\times10^9$ Кюри и объемом более 510 млн м$^3$. Наиболее токсичными и опасными для населения и окружающей среды являются высокоактивные РАО (период их радиобиологической опасности превышает 10 тыс. лет). Их удаление из среды обитания человека отражает важнейшую общественную потребность населения страны и, может быть, выполнено единственным осуществимым способом – захоронением в глубокие геологические формации. Для этого необходимо выбрать участки земной коры, где свойства, состояние и процессы, происходящие в верхней части земной коры, обеспечат надежную изоляцию РАО на указанный период времени. Согласно требованиям МАГАТЭ, обязательным этапом этого процесса является строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), необходимой для уточнения характеристик массива горных пород принятия окончательного решения. В России для строительства ПИЛ выбран участок «Енисейский» в пределах Нижне-Канского массива (Красноярский край).

В последние 15–20 лет было создано новое научное направление в области горных наук и геоэкологии, направленное на оценку длительной устойчивости геологической среды в приложении к проблеме захоронения РАО [1]. Успешность ее решения определяется, в первую очередь, надежностью и достоверностью исходных данных о геологии, тектонике и геодинамике. Для данного района их недостаточно, они разноформатны и зашумлены. Поэтому, для преодоления такого рода неопределённостей при оценке устойчивости геологической среды впервые были применены методы и алгоритмы системного анализа пространственных геолого-геофизических данных, созданных научной школой академика А.Д. Гвишиани [2].

В контексте данной проблемы под устойчивостью структурно-тектонического блока, в котором планируется захоронение РАО, понимается его способность при природных и техногенных воздействиях сохранять или изменять свойства и состояние в диапазоне, который не приведет к потере изоляционных свойств пород и выходу радионуклидов за пределы санитарно-защитной зоны на весь период радиобиологической опасности РАО. Исследования включают в себя методы, направленные на выявление блочных структур и активных геодинамических зон, инструментальные наблюдения за современными движениями и деформациями с использованием средств ГНСС, сейсмологический мониторинг, методы численного моделирования напряженно-деформированного состояния пород, методы системного анализа пространственных геолого-геофизических параметров, метод кинематического геодинамического районирования и др.

Теоретические разработки позволили решить ряд важнейших задач в области безопасного обращения с радиоактивными отходами и получить новые экспериментальные результаты о геодинамике района. В районе участка «Енисейский» был создан уникальный геодинамический полигон для ГНСС-наблюдений за

современными движениями земной коры на основе ГНСС-технологии [3]. Впервые в зоне контакта крупнейших тектонических структур – Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты (южная часть Енисейского кряжа) установлена цикличность геодинамических движений, рассчитаны скорости деформаций земной коры, построены оси напряжений в блоках и выполнено кинематическое районирование. Разработаны новые алгоритмы кластеризации и программные модули системного анализа и интерпретации данных геолого-геофизических и геодезических наблюдений. Их новизна заключается в оригинальном подходе к анализу данных с использованием методов дискретного математического анализа и искусственного интеллекта, позволяющих выработать единую оценку устойчивости структурных блоков по системе разноранговых признаков. В качестве меры устойчивости предложена интегральная динамическая мера активности на основе единого скалярного показателя (рис.).

Создана новая методология системного анализа пространственных данных для оценки устойчивости геологической среды, а также получены важные данные, позволившие оптимизировать и формализовать процесс оценки геодинамического режима в районе захоронения высокоактивных РАО. Результаты внедрены в «Стратегический мастер-план» научных исследований в ПИЛ на участке «Енисейский» в рамках ФЦП ЯРБ-2. На его основе в ГК «Росатом» утверждена «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов». В настоящее время в районе строительства ПИЛ специалистами ГЦ РАН продолжаются комплексные геодинамические исследования (геодезия, ГНСС, сейсмомониторинг, моделирование полей напряжений, геомеханика и др.).

1. *Андерсон Е.Б., Белов С.В., Татаринов В.Н. и др.* Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Издательство «Горная книга», 2011. 592 с.

2. *Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринов В.Н.* Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика Земли. 2019. №1. С. 42–60.

3. *Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И.* Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по данным ГНСС наблюдений // Геофизические исследования, 2018. Том 19, № 4. С. 64–79.

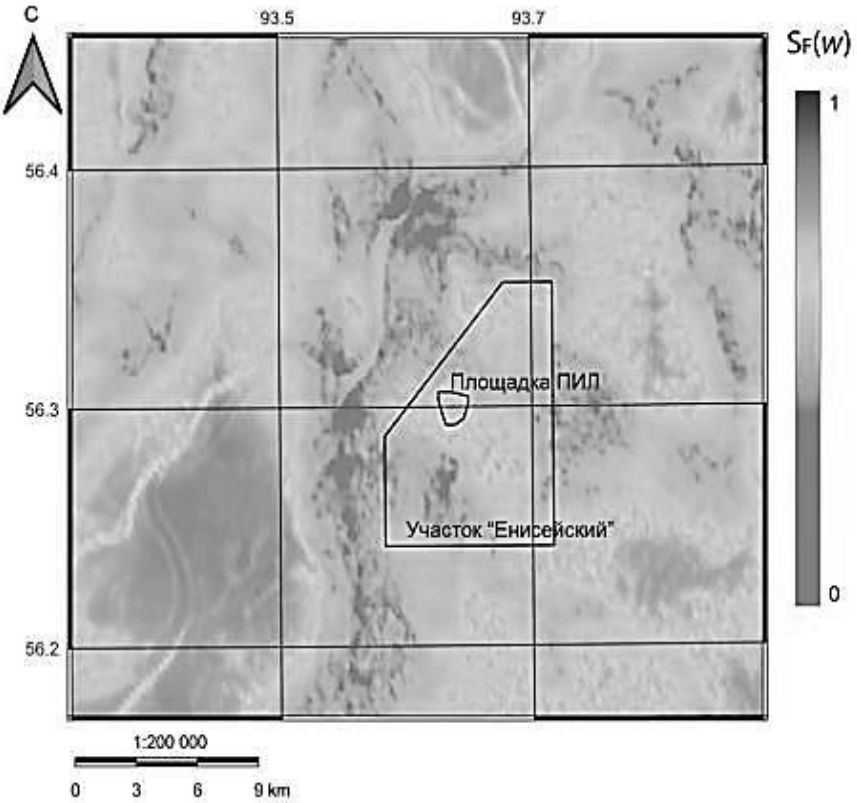



Рисунок. Карта обобщенной интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$. Шкала: безопасные $S_F \geq 0{,}65$, нейтральные или переходные $0{,}45 < S_F < 0{,}65$, опасные $S_F \leq 0{,}45$ участки

# НЕФТЕГАЗОВЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ – ВАЖНЕЙШЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ НАУК О ЗЕМЛЕ В ОБЛАСТИ НЕФТЕ-, ГАЗО-, УГЛЕДОБЫЧИ

*А.Я. Хавкин*

ФГАОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа
им. И.М. Губкина, *г. Москва*
aykhavkin@yandex.ru

В соответствии с Постановлением Правительства РФ [1], в задачи РАН входят прогнозирование основных направлений научного, научно-технологического и социально-экономического развития РФ и экспертное научное обеспечение деятельности органов государственной власти РФ.

По мнению Президента РФ В.В.Путина, нефтегазовые ресурсы (основа бюджета страны) у нас используются недостаточно рачительно [2]. Мнение Президента РФ сегодня подтверждается такими проблемами, как низкая проектная нефтеотдача (36%), высокая себестоимость нефтедобычи (важным рычагом развала СССР стало снижение цены на нефть ниже окупающей ее себестоимость), регулярные взрывы угольно-метановой смеси в шахтах, еще более регулярные взрывы при использовании природного газа в быту.

С 1990-х годов в ОНЗ РАН уделяется большое внимание наноразмерным (0,1–100 нм) аспектам геологии горных пород [3–6]. Вместе с тем, как показано автором, проблемы с добычей нефти, газа и угля также связаны с наноразмерными явлениями в горных породах [7–16], за что автор в 2010г. был удостоен Медали ЮНЕСКО [17].

Автором сформулированы научные основы и математические модели разработки залежей нефти с низкопроницаемыми коллекторами с учетом ионнообмена водной фазы с глинистыми минералами, что позволяет обосновать минерализацию закачиваемой воды в зависимости от геологии объекта на основе учета введенного автором коэффициента активной глинистости. Как показали лабораторные эксперименты, использование реагентов, регулирующих активность глинистых минералов, позволяет ожидать достижение нефтеотдачи на уровне 45–50% и более.

Доля вытесняющей нефть воды в добывающих скважинах в среднем по России значительно превышает 80%, приводя к тому, что вместе с нефтью на поверхность поднимается в 5–6 раз больше соленых пластовых вод, что существенно увеличивает себестоимость добычи нефти. Разработанные с участием автора нанотехнологии, снижающие объем поднимаемой воды при увеличении объема поднимаемой нефти, вносят значимый вклад в экологию нефтедобычи и снижение себестоимости добычи нефти.

Очень важным является учет коэффициента гидродинамической дисперсности горных пород, введенный в научный оборот автором, и характеризующий наноразмерные явления при движении нефти в капилляре. Неучет его привел к недобору Россией более 100 млн т нефти в год относительно проектных показателей (550 млн т вместо 680 млн т). Также существенную роль при расчете проектных показателей добычи нефти имеет учет капиллярного гистерезиса (наноразмерное явление смачивания).

Учет большой доли наноразмерных (менее 10 нм) пор в углях позволил предложить ряд нанотехнологий, позволяющих увеличить предизвлечение метана до начала добычи угля, уменьшающих «спонтанные» выбросы метана в шахты, снижающих негативное влияние угольно-метановой смеси в шахтах на аварии и экологию угледобычи.

Нанотехнологический подход позволил обосновать технологию разработки месторождений газогидратов; увеличение температуры получения и стабильности метангидрата; безопасное (поскольку метангидрат не взрывается) использование его в быту и как энергоресурс для транспорта; торговлю метангидратом и его транспортирование, в том числе и на экспорт; а также наличие плавающих слоев метангидрата в водных средах (что важно при морских геофизических исследованиях).

Анализ фотографий капилляров в наноразмере показал, что капилляры горных пород покрыты изнутри «персидским наноковром». Обоснованная автором закономерность влияния капиллярного гистерезиса на нефтеотдачу позволила сформулировать задачу для прикладной минералогии горных пород – трансформация форм различных минеральных комплексов в горной породе, приводящая к уменьшению капиллярного гистерезиса и тем самым к увеличению нефтеотдачи.

Вывод: развитие работ в РАН по нефтегазовым нанотехнологиям столь же значимо для достоверного информирования руководства РФ о перспективах нефтегазовой отрасли, как было значимо в физике развитие работ по неньютоновской механике.


1. Постановление Правительства РФ № 496 от 25.04.2019г. «О внесении изменений в Устав федерального государственного бюджетного учреждения «Российская академия наук» // Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=ad34621b-648d-4c3b-aced-2f0d546958b8. Обращение 12.03.2022г.

2. *Путин В.В.* Россия является мировым лидером в добыче нефти и газа // Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rosbalt.ru/2007/08/06/404147.html.

3. *Рундквист Д.В.* Доклад на годичном собрании ОГГГН РАН 23 марта 1998г. // Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://geo.web.ru/db.

4. *Богатиков О.А.* Неорганические наночастицы в природе. // Вестник РАН, 2003. Т. 73. № 5. с. 426-428.

5. *Асхабов А.М.* Особенности современного этапа вторжения в «мир обойденных величин» // Минералогическая интервенция в микро- и наномир: Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. С. 9–10.

6. *Конторович А.Э., Тимошина И.Д.* Насыщенные углеводороды-биомаркеры в нефтях и битумах Непско–Ботуобинской антеклизы // Химия нефти и газа, Материалы конференции 21–26 сентября 2009г., Томск, ИХН СО РАН, С. 228–232.

7. *Хавкин А.Я.* Модель вытеснения нефти в пористых средах // ДАН, 1998. Т.358. № 2. С. 193–195.

8. *Хавкин А.Я.* Гидродинамические основы разработки залежей нефти с низкопроницаемыми коллекторами // М.: МО МАНПО, 2000. 525 с.

9. *Хавкин А.Я.* Геолого-физические факторы эффективной разработки месторождений углеводородов / Под. ред. акад. А.Н. Дмитриевского // М.: ИПНГ РАН, Спутник, 2005. 312 с.

10. *Хавкин А.Я.* Нанотехнологии нефтеизвлечения // М.: Спутник+, 13.07.2006. 16 с.

11. Хавкин А.Я. Нанотехнологические инновации в газовой промышленности // Газовый бизнес, 2009. Март–апрель, С. 62–64.

12. *Хавкин А.Я.* Наноявления в нефтегазодобыче // Вестник РАН, 2009. № 6. С. 519–522.

13. *Хавкин А.Я.* Самоорганизация наноминеральных комплексов глин и нефтедобыча // НАНОтехнологии Экология Производство, ноябрь 2009. № 2. С. 94–99.

14. *Khavkin A.Ya.* Prospects of Oil&Gas Nanoindustry // Nanomaterials Yearbook – 2009, From Nanostructures, Nanomaterials and Nanotechnologies to Nanoindustry, Nova Science Publishers, Inc., N.Y., 2010, p.125–143.

15. *Хавкин А.Я.* Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа / Под ред. чл.-корр. РАН Г.К.Сафаралиева // М., ИИКИ, 2010, 692 с.

16. *Хавкин А.Я.* Физика нефтегазовых пластов и нелинейные явления // Учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина. 2019. 288 с.

17. Медаль ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий» // Наука и технологии в промышленности, 2011, № 4, с.62–63.

# «ГЕОГРАФИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ»

## ОБЪЕКТИВНОСТЬ И НОВОЕ КАЧЕСТВО ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ

*И.Н. Владимиров*
ФГБУН «Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН», *г. Иркутск*
garisson@irigs.irk.ru

Еще недавно в географических исследованиях, и в частности, ландшафтном картографировании, применялись аналоговые методы, но в XXI веке они практически вытеснены новыми методами и технологиями, основное место среди которых занимает геоинформационное моделирование.

К одному из главных преимуществ геоинформационных технологий относится устранение недостатков традиционного картографирования и моделирования, увеличение объективности при выделении ландшафтных выделов, увеличение качества и скорости обработки больших объемов информации, GRID-моделирование.

Автоматизированное построение ландшафтной карты возможно лишь только для части количественных показателей, при создании карт необходимо учитывать, что многие количественные показатели имеют отношение не к конкретной геосистеме определенного ранга в целом, а к ее отдельным компонентам или элементам, и без данных экспедиционных исследований могут быть не только бесполезными, но и в корне неправильными.

Универсальное ландшафтное картографирование, базирующееся на принципах структурно-динамической и типологической классификации геосистем, является эффективным методом изучения и моделирования пространственно-временной организации геосистем, выявления и оценки экологического потенциала.

Развитие компьютерных технологий позволяет упростить процедуры выявления и распознавания объектов местности на данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и перейти от визуального дешифрирования ландшафтов к автоматизированному географическому анализу ландшафтоформирующих компонентов, что ускоряет проведение географического анализа изображений, но необходимо отметить, что они не должны подменять результаты полевых исследований и уже устоявшиеся понятия, методы исследования, а дополнять их - выводить на новый технологический уровень.

Все ландшафтные картографические исследования укладываются в единую систему географического прогнозирования и создают новую фундаментальную научную базу для разработки рекомендаций по оптимизации природопользования.

Картографирование эффективно на всех этапах географического прогнозирования. Выделяются универсальные и специальные (оценочные и прогнозно-рекомендательные)

карты. С программно-целевых позиций географическое прогнозирование следует рассматривать как единый сложный многоэтапный картографический процесс, имеющий свою логику и структуру.

На первом, инвентаризационном этапе центральное место в прогнозно-географических исследованиях занимает изучение пространственной и динамической структуры геосистем региона. Наиболее эффективно на данном этапе универсальное ландшафтное картографирование, опирающееся на принципы структурно-динамической и типологической классификации геосистем, разработанных академиком В.Б. Сочавой.

Оценочный этап изучения экологического потенциала прогнозно-картографических исследований опирается на ДДЗ, информацию о состоянии растительности, на универсальную карту геосистем. Все это является информационной базой при составлении специальных оценочных карт в сопряженном масштабе. Содержание таких карт определяется задачами получения необходимой информации об особенностях геосистем, необходимых для дальнейшей разработки прогнозов и получения объективных результатов. К числу таких важных характеристик геосистем относятся показатели ее состояния и нарушенности, ее экологического потенциала, а также степень ее естественной и антропогенной устойчивости.

Представление об экологическом потенциале геосистем, которое опирается на конструктивное антропоцентрического объединение двух подходов к его оценке – природоцентрического и , с основным акцентом на первый, – позволяет выявить важнейшие интегральные свойства геосистем, обеспечивающие рациональное экологически ориентированное природопользование и предупреждение экологических рисков.

Выявление, оценка и прогнозирование динамики и экологического потенциала геосистем образуют единый многоступенчатый процесс географического прогнозирования, объединенный концепцией учения о геосистемах и общей целью формирования научного обоснования экологически ориентированного природопользования в регионе с учетом его природно-географических особенностей

Прогнозно-динамическое моделирование геосистем и их компонентов позволяет комплексно учитывать структурные и функциональные динамические проявления в геосистемах при разработке основных мероприятий по оптимизации природопользования и сохранению качества природной среды. В результате исследования проанализировано применение различных алгоритмов классификаций геоизображений при геоинформационном моделировании современного состояния растительности геосистем; доказана невозможность заблаговременного выбора алгоритма с позиций соотношения точности классификации и полноты данных. Предложена и апробирована методика геоинформационного моделирования растительности геосистем, предполагающая совместное использование индексов NDVI и NDWI, цифровой модели рельефа, методов алгебры логики (дерево решений) и материалов экспедиционных исследований. Разработана и реализована методика прогнозно-динамического картографирования растительности на различных уровнях организации геосистем, показана возможность вариантных расчетов для оценки воздействия планируемых хозяйственных мероприятий на природную среду.

Особенностью прогностического этапа является его собственная оценочная составляющая, т.к. после создания прогнозного представления о геосистемах или растительности будущего, необходимо еще и провести оценку прогноза с экологической и ресурсной позиций. Все это необходимо для разработки рекомендаций по хозяйственной деятельности, нацеленных на снижение или недопущение экологических или ресурсных нежелательных последствий.

На основе анализа природных и антропогенных источников негативного воздействия на геосистемы Байкальской Сибири выполнена оценка пространственного изменения

условий природной среды, вызывающих ухудшение нормальных условий жизнедеятельности и здоровья людей, истощение или утрату природных ресурсов, снижение или утрату средо- и ресурсоформирующих свойств геосистем.

С использованием опыта территориального планирования и научного обоснования экологической допустимости размещения объектов хозяйственной деятельности в ЦЭЗ БПТ с использованием методического аппарата ландшафтного планирования разработаны конкретные мероприятия по оптимизации природопользования в Байкальской Сибири, базирующиеся на учете экологического потенциала геосистем региона.

Таким образом, многоэтапные картографические исследования включаются в единую систему географического прогнозирования, повышают объективность географических знаний и создают новую фундаментальную научную базу для разработки рекомендаций по оптимизации природопользования в рамках реализации государственной экологической политики.

# КРИОЛИТОЗОНА СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИИ: СОСТОЯНИЕ, ПРОГНОЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

*М.Н. Железняк*

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН», *г. Якутск*
fe1956@mail.ru

Криолитозона – это особая среда биологической жизни и функционирования инженерных сооружений с которой они тесно связаны и определяются её состоянием. Устойчивое развитие северных экосистем в условиях изменяющегося климата и освоения природных ресурсов невозможны без учета этого динамичного компонента природной среды, особенностью которой является наличие мерзлых толщ с подземными льдами.

Изучение особенностей распространения, залегания, динамики многолетнемерзлых толщ традиционно является географическим направлением, однако на современном этапе развития геокриологии невозможно обойтись без использования геофизических методов – которые становятся опорными в получении информации о параметрах и состоянии мерзлоты. Вслед за П.Ф. Швецовым, П.И. Мельниковым, И.Я. Барановым, В.Ф. Туммелем, В.А. Кудрявцевым, Н.А. Граве, Н.Н. Романовским, И.А. Некрасовым, В.Т. Балобаевым, – считая себя учеником последних, автор продолжает исследования по изучению особенностей распространения, залегания и динамики криогенной толщи в различных природно-климатических условиях. Несмотря на значительные сокращения геологоразведочных работ в РФ, усложнившиеся условия взаимодействия горно-геологических компаний с научными организациями, в последние годы получены новые знания о состоянии и параметрах многолетнемерзлой толщи Алдано-Станового нагорья, Вилюйской синеклизы, Енисей-Хатангского прогиба, Анабарской антеклизы и Верхоянской складчатой области. Выполнены работы по оценке теплофизических свойств горных пород, дана оценка величины внутриземного теплового потока, построены серии геокриологических карт, мерзлотно-геотермических разрезов. Разработан новый научно-методологический подход к оценке и картированию параметров криолитозоны (мощности ММТ, температуры пород, глубины протаивания-промерзания) в горных областях, выявлены региональные многомерные зависимости этих параметров от комплекса природных факторов [1].

На основании анализа геотермических данных, выполнена оценка особенностей распространения, залегания, мощности ММТ в областях развития нестационарных мерзлых толщ. Установлено наличие в верхней части разреза зон с нестационарным тепловым режимом, выявлены области с отрицательным температурным градиентом, интервал которых варьирует от 70 до 250 м. Наличие геотермических данных в глубоких (до 2000 м) скважинах, лабораторные исследования теплофизических свойств позволили выполнить палеореконструкцию мерзлых толщ на период 150 тыс. лет [1, 2].

Изменения климата, особенно интенсивно происходящие за последние 50 лет, оказывают существенное влияние на состояние мерзлых толщ. Так повышение среднегодовой температуры воздуха за этот период в различных регионах Восточной Сибири варьирует от 1,2 до 3,4 °С. Однако, реакция криолитозоны, тренды изменения температуры пород и глубины сезонного протаивания в ряде случаев в прямой зависимости от температуры воздуха и варьируют, в зависимости от ландшафтных условий и режима выпадения атмосферных осадков. Так по данным режимных наблюдений только в Центральной Якутии тренд изменения температуры пород варьирует от 0,05 до 0,50 °С\10 лет, а в Южной Якутии эта величина изменяется от 0,03 до

0,70 °C\10. Для Арктической зоны в типичных тундровых ландшафтах отмечено некоторое (0,3-0,4 °C/10 лет) повышение температуры пород на подошве слоя годовых теплооборотов. При отсутствии выраженной тенденции к увеличению глубины сезонного протаивания мерзлых пород отмечается межгодовая его изменчивость, связанная с короткопериодными колебаниями сезонных и средних годовых температур приземного воздуха и режима выпадения атмосферных осадков. На основании режимных наблюдений выполнена оценка реакции криолитозоны на изменение климата в различных регионах Северо-Востока Азии [3, 4]. Совместно с сотрудниками институтов СО РАН изучены сукцессионные преобразования ландшафтов после природно-техногенных нарушений [5].

Создание геокриологической базы данных (ГБД) с возможностью вести оперативную работу с большим массивом материалов, их статистической и аналитической обработкой, является основой для получения новых знаний. В настоящее время нами разработана структура, созданы и зарегистрированы геокриологические базы данных Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы, ведутся работы по подготовке геокриологических баз данных и региональных обобщений по Тунгусской синеклизе, Анабарской антеклизе, Енисей-Хатангскому и Предпатомскому прогибам, Верхоянской складчатой области.

Сотрудниками ИМЗ СО РАН под руководством и при участии автора продолжены фундаментальные экспериментальные исследования по оценке роли природных факторов на формирование криолитозоны. Выполнены экспериментальные исследования по оценке роли снежного покрова, инфильтрации атмосферных осадков и внутригрунтовой конденсации. Основываясь на материалах полевых геокриологических, геофизических и геолого-съемочных работ дана оценка площади распространения криолитозоны (криогенной толщи) и подземных льдов в горах Северного Тянь-Шаня. Впервые установлено, что запасы подземных льдов здесь оцениваются в 56 км$^3$, что составляет примерно 62% от объёма современных ледников (90 км$^3$) [6].

На основании анализа геоморфологических, растительных, микроклиматических и грунтовых особенностей территории создаются карты устойчивости мерзлотных ландшафтов к изменению климата и различным типам инженерных сооружений. Так для обеспечения устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне выполнено инженерно-геокриологическое районирование участков ФАД «Вилюй», «Колыма», разработаны принципы и предложен перечень необходимого оборудования для создания системы контроля (мониторинговых участков) состояния основания автомобильной дороги. Другой серьезной задачей в обеспечении устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне является создание научно-испытательного полигона идея и структура, не имеющая аналогов в мировой практике, сегодня разработана.

Фундаментальной и основополагающая работа была выполнена мерзлотоведами РФ по заказу Министерства развития Дальнего Востока и Арктики, в которой разработана структура создания и управления системой «Мониторинг криолитозоны АЗРФ». Дана оценка возможного ущерба от деградации ММТ на инженерные сооружения в АЗР.

1. *Железняк М.Н.* Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск. Наука, 2005. 228 с.

2. *Железняк М.Н., Семенов В.П.* Геотемпературное поле и криолитозона Вилюйской синеклизы. Изд. Новосибирск: СО РАН. Новосибирск. Наука, 2019. 123 с

3. *Michael Zhelezniak, Aleksandr Zhirkov, Anatolii Kirillin* The development of mountain permafrost in the Stanovoy Upland. Journal of Engineering of Heilongjiang University. Vol. 5, No. 3, Sep., 2014, articles 1-7.

4. *Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н.* Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии Изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН г. Якутск, 2021. 156 с.

5. *Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Zheleznyak M.N.*, et ab Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1.500.000 \ Geosciences 8(12), 2018.

6. *Gorbunov, A.P., Zheleznyak M.N., Severskiy, E.V. Estimate* of the volume of ground ice in the Tien-Shan Mountains \ Earth's Cryosphere 2018, № 22(6).

# ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ МОРФОЛИТОГЕНЕЗА, ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОСИСТЕМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

*И.Д. Зольников*

ФГБУ «Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева» СО РАН, *г. Новосибирск*
zolnikov@igm.nsc.ru

Геолого-геоморфологический каркас во многом предопределяет не только статическую составляющую современных геосистем, но и обуславливает территориальную специфику их трансформаций в условиях глобальных изменений природной среды и климата. Ретроспективное моделирование палеогеографических обстановок на протяжении всего позднего кайнозоя в целом и верхнего неоплейстоцена (последних 130 тыс. лет) в особенности, позволяет лучше понять закономерности пространственно-временной организации геосистем и соответственно повысить адекватность прогнозов поведения среды обитания в таком критически важном для ресурсообеспечения Российской Федерации регионе, как Западная Сибирь, включая как равнинные территории, так и горное обрамление.

Исследования на рубеже XX–XXI веков показали, что традиционные представления середины прошлого века о стратиграфии и палеогеографии позднего неоплейстоцена Западной Сибири существенно устарели и полны противоречий, что в свою очередь привело к появлению альтернативных мнений по поводу происхождения рельефообразующей толщи региона. Прежде всего следует отметить, что оказалась несостоятельной концепция формирования низких (верхнечетвертичных) террас и террасоувалов магистральных рек Сибири (Оби, Енисея, Ангары, Лены), согласно которой нижний ярус региональной террасы был представлен аллювиальными отложениями межледниковья, а верхний преимущественно перигляциальным аллювием, который отлагался при подпруживании долин северными ледниками. В соответствии с этой концепцией доминировала стратиграфо-палеогеографическая концепция о региональной лестнице террас казанцевского, каргинского, сартанского возраста заложения. Применение массового датирования современными методами AMS–C14 и OSL в рамках международных проектов PECHORA & QUEEN привело к выводу о том, что в эпоху последнего ледникового максимума (LGM) 25–15 тыс. л.н. на севере Сибири ледниковый покров отсутствовал, а в магистральных долинах юга Сибири соответственно отсутствовали следы подпруживания. Более того, выяснилось, что почти все стратотипы для верхнего неоплейстоцена региона не валидны.

Созданию принципиально новой концепции формирования и строения магистральных долин Сибири способствовало открытие феномена гляциальных суперпаводков из-за прорывов ледниково-подпрудных бассейнов в межгорных котловинах. На настоящий момент для верхнего неоплейстоцена следы суперпаводковых событий установлены в долинах Оби, Енисея, Лены. Суперпаводковые отложения, формирующиеся на завершении оледенения второй ступени верхнего неоплейстоцена (около 90–60 тыс. л.н.), обладают мощностью на порядок больше, нежели межледниковый аллювий и выступают в виде регионального репера, протягивающегося из гор на равнину вплоть до побережья Северного Ледовитого океана. При этом следует отметить, что почти синхронно с прорывом вод ледниково-подпрудных бассейнов из межгорных котловин

Алтае-Саянской горной области происходит спуск озер, подпруженных северными ледниками. Детальные фациально-генетические и геохронологические исследования отложений, слагающих низкие террасы и террасоувалы долин Оби, Ангары и Енисея показали, что отложения, принимавшиеся ранее за перигляциальный аллювий, представлены как правило разными генетическими типами субаэрального. Кроме того, установлено, что геоморфологический критерий не позволяет определять возраст верхнечетвертичного аллювия, поскольку высота приречной поверхности определяется мощностью субаэрального покрова, которая может существенно варьировать в зависимости от местных и локальных условий. В результате многолетних работ нами разработаны местные стратиграфические схемы для верхнего неоплейстоцена Горного Алтая и Большой Оби (Нижнее Приобье).

Как в магистральных долинах, так и на обширных водораздельных территориях Сибири геолого-геоморфологический каркас территории предопределяет пространственное строение наземных экосистем. В рамках интеграционных проектов СО РАН и грантов РФФИ, РНФ нами в сотрудничестве с исследователями смежных специализации (ЦСБС, ИПА СО РАН и др.) разработаны методики картографирования и мониторинга гетерогенных ПТК с использованием ГИС и ДЗ. В частности, для крупно- и среднемасштабного картографирования высокую эффективность показала методика полуавтоматического и автоматического распознавания форм и типов рельефа на основе обработки цифровых моделей рельефа и космоснимков. Эти технологии были апробированы на примере ключевых районов Горного Алтая и Предалтайской равнины. На примере Чуи и Катуни разработана методика геоинформационного районирования магистральных речных долин горных территорий. Установлена специфика проявления короткопериодичной динамики климата для разных районов по динамики озер и солончаков. Для Барабинской лесостепи на основе картографирования и космомониторинга ключевых параметров природной среды разработаны прогнозные схемы трансформации природных обстановок в двух альтернативных вариантах климатических изменений ближайшего будущего: иссушения и увлажнения; построены модели экзодинамической уязвимости территории. Для приморских низменностей Российской Арктики разработаны методики геоинформационного картографирования криогенного рельефа среднего, крупного (на основе космоснимков) и детального (на основе данных с БПЛА) масштабов, что может быть использовано и для мониторинга.

На примере Новосибирского Академгородка и его окружения разработана методика ГИС-моделирования мозаичной природно-антропогенной системы (прежде всего растительность и техно-инфраструктура). Разработана методика количественной оценки соответствия урбанизированной территории нормам по плотности населения, озеленения и селитебной нагрузки, апробированная в муниципальных службах Новосибирска. Интересна методика реконструкции изменений кормящих ландшафтов при внутривековых климатических колебаниях последние 6 тысяч лет на юге Западно-Сибирской равнины. Она основана на приуроченности археологических памятников различных культур (от бронзового века до средневековья) к разным формам рельефа. Совместно с сотрудниками ИАЭТ СО РАН на основе моделирования ключевых абиотических факторов, контролирующих обстановки жизнеобитания человека, простроена модель прогноза при поиске памятников палеолита для Горного Алтая, верифицированная при изысканиях вдоль планировавшегося газопровода в КНР. Прогноз о перспективе обнаружения памятников палеолита на севере Оби верифицирован открытием стоянок Луговское, Комудваны, Кушеват что удревняет время инициального заселения Нижнего Приобья человеком современного типа.

Таким образом, палеогеографическая основа, обеспечивающая знания об условиях формирования и строения рельефообразующей толщи, в сочетании с новейшими технологиями картографирования и мониторинга на основе ДДЗЗ является эффективной основой для картографирования и мониторинга геосистем Западной Сибири, что необходимо при развитии территорий путем рационального природопользования.

# ЯЗЫК ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ: АЛФАВИТ И СИНТАКСИС

*И.С. Новиков*
ФБГУН «Институт геологии и минералогии
им В.С.Соболева СО РАН», *г. Новосибирск*
novikov@igm.nsc.ru

В настоящее время геоморфология все еще находится на уровне наблюдения, когда создается описание базовых, эмпирически установленных фактов, связанных между собой перекрестными ссылками. Переход на следующий, феноменологический, уровень где вводится совокупность базисов классификации и создается множество научных теорий, которые позволяют из некоторого набора эмпирических фактов получить новые реперные факты т.е. предсказать их неизбежное присутствие в определенных обстоятельствах, еще только предстоит. Иными словами, перейти к синтаксису невозможно без предварительного определения алфавита и фиксируемых им слов. Применительно к геоморфологии это означает что сначала следует разделить земную поверхность на элементы, потом произвести их классификацию и затем приступить к изучению взаимосвязей между элементами и их закономерными сочетаниями.

Наиболее перспективным методом разделения земной поверхности на элементы в настоящее время является выделение генетически однородных поверхностей. В процессе развития метода в ходе дискуссии сомнению подвергались многие его положения, кроме одного. Впервые метод был озвучен в докладе офицера отдела военно-географических описаний Генерального штаба Красной Армии Ю.К. Ефремова в марте 1945 г. на кафедре картографии МГУ, материалы которого были опубликованы сборнике Вопросы географии [1]. В силу комплекса причин [2], метод не стал обязательным при проведении государственной геологической съемки и в настоящее время накоплением и классификацией информации об элементах рельефа каждый исследователь занимается самостоятельно.

Нами было проведено изучение рельефа с выделением его элементов на 14 ключевых участках Восточного Средиземноморья, Северного Причерноморья, Западной и Восточной Сибири, Центральной Азии. В результате была разработана универсальная классификация генетически однородных поверхностей и индексация элементов, удобная при использовании ГИС-технологий. Класс аккумулятивных поверхностей (1000) включает 13 семейств. 1. Ледяные и фирновые (1010). 2. Моренные (1020). 3. Водно-ледниковые (1030). 4. Озерные (1040). 5. Морские (1050). 6. Гравитационные (1060). 7. Водно-гравитационные (1070). 8. Временных водотоков (1080). 9. Постоянных водотоков (1090). 10. Болотные (1100). 11. Вулканические (1110). 12. Эоловые (1120). 13. Антропогенные (1130). Класс денудационных поверхностей (2000) включает 11 семейств. 1. Комплексной денудации (2140). 2. Избирательной денудации (2150). 3. Склоновой экзарации (2160). 4. Донной Экзарации (2170). 5. Гравитационные (2180). 6. Делювиальные (2190). 7. Карстовые (2200). 8. Эрозионные (2210). 9. Тектоногенные (2220). 10. Абразионные (2230). 11. Антропогенные (2224).

В различных геолого-геоморфологических обстановках каждое семейство включает несколько видов, отличающихся интенсивностью, длительностью и временем прекращения рельефообразующих процессов, отвечающих за данное семейство. В пределах конкретных ключевых участков количество видов обычно не превышает 3, а для всего массива данных 9, что позволяет их индексировать в последнем разряде численного индекса семейства. Помимо теоретической значимости изучения закономерностей строения рельефа геоморфологические модели, построенные на основании метода генетически однородных поверхностей, являются надежной основой

для построения специальных карт. Разработан ряд методов построения таких карт для силовых структур (Патенты 2 502047 C 1, 2 548389 C 1, 2 564826 C 1).

Элементы рельефа образуют закономерные повторяющиеся сочетания, образующие геоморфологические формации. В пределах изученной части Северной и Центральной Азии выделены следующие геоморфологические формации, 1. Эоловые равнины. 2. Озерные равнины. 3. Аллювиально-пролювиальные равнины древние. 4. Аллювиально-пролювиальные равнины современные. 5. Аллювиальные равнины. 6. Комплексы межгорных впадин. 7. Пролювиальные шлейфы. 8. Пролювиальные равнины. 9. Пластовые равнины. 10. Моренные равнины. 11. Вулканогенные равнины. 12. Катафлювиальные равнины. 13. Эрозионные мегадолины. 14. Эрозионный мелкосопочник форбергов. 15. Эрозионно-денудационный мелкосопочник предгорий. 16. Куэстовый мелкосопочник. 17. Денудационный мелкосопочник (пенеплен). 18. Эрозионно-денудационное низкогорье с остатками пенеплена. 19. Эрозионно-денудационное среднегорье с остатками пенеплена. 20. Эрозионно-экзарационное высокогорье. 21. Пластовые равнины под сплошным тонким чехлом рыхлых отложений. 22. Пенеплены под тонким чехлом рыхлых отложений.

**Что сделано.** Разработаны критерии выделения генетически однородных поверхностей Центральной и Северной Азии. Разработана классификация и систематика генетически однородных поверхностей Центральной и Северной Азии. Проведено выделение генетически однородных поверхностей на ключевых участках основных геоморфологических формаций. Произведен переход на выделение генетически однородных поверхностей средствами геоинформационных систем. Разработаны и защищены патентами алгоритмы составления карт специального назначения на базе цифровых карт генетически однородных поверхностей. Проведено полевое изучение ключевых участков основных геоморфологических формаций Центральной и Северной Азии. Создана база исходных данных и начато составление картографической модели основных геоморфологических формаций Центральной и Северной Азии.

**Что предстоит сделать.** Создать базу образов генетически однородных поверхностей Центральной и Северной Азии. Перейти к автоматическому выделению на основе распознавания образов с использованием нейронных сетей. Продолжить составление картографической модели основных геоморфологических формаций Центральной и Северной Азии средствами ГИС. Распространить картографическую модель геоморфологических формаций Центральной и Северной Азии в полосе 78–102° от Ледовитого до Индийского океанов. Провести анализ изменчивости генетически однородных поверхностей и геоморфологических формаций в зависимости от геологического субстрата и климатической зоны в пределах полученного площадного танссекта. Изучить закономерности ассоциаций генетически однородных поверхностей разных геоморфологических формаций. Установить статистические закономерности распределения ассоциаций генетически однородных поверхностей в разных геоморфологических формациях. Перейти к автоматизированному составлению специальных карт разного уровня детализации на основе картографических моделей генетически однородных поверхностей и геоморфологических формаций.

1. *Ефремов Ю.К.* Опыт геоморфологической классификации элементов и простых форм рельефа // Вопросы географии. Сб. 11. Картография. М.: Географгиз, 1949. С. 109–136.

2. *Новиков И.С.* Обзор становления отечественных картографических исследований в области геологической геоморфологии (превратности метода) // Геоморфология. 2003. № 2. С. 28–42.

# КОСМИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА РОССИИ

*С.А. Барталев*

ФГБУН «Институт космических исследований РАН», *г. Москва*
bartalev@d902.iki.rssi.ru

Обширная территория и огромные биологические ресурсы выделяют Россию из ряда других стран и накладывают на неё дополнительную ответственность по поддержанию устойчивости биосферы, как на национальном, так и на планетарном уровне. Особенно остро в настоящее время стоит проблема оценки и использования климаторегулирующего потенциала наземных экосистем страны в интересах реализации Стратегии низкоуглеродного развития Российской Федерации [1]. Вместе с тем, обеспеченность актуальной и достоверной информацией о состоянии растительного покрова страны в настоящее время является недостаточной и не отвечает современным политическим, экономическим и экологическим вызовам. Разрозненные данные отдельных ведомств часто несопоставимы и не дают целостной картины актуального состояния растительного покрова и, следовательно, не могут быть положены в основу анализа и прогнозирования его динамики. Указанные предпосылки служат основанием для развития и широкого применения методов картографирования растительного покрова, основанных на использовании систем дистанционного зондирования Земли из космоса.

С начала текущего столетия космические средства наблюдения Земли получили колоссальное развитие и к настоящему времени прочно заняли ведущее место в ряду методов географических исследований растительного покрова нашей страны и планеты в целом [2]. Не останавливаясь детально на исторических аспектах формирования современного облика методологии космического картографирования растительного покрова, отметим, что вектор текущего развития данного научного направления в России в значительной степени был определен выполненными при непосредственном участии и под руководством автора представляемого доклада исследованиями и разработками, обеспечившими возможность регулярного получения информации о состоянии и динамике растительности на всей территории страны [3, 4]. К числу отличительных черт развиваемой методологии спутникового картографирования растительного покрова можно отнести следующие основные положения:

– направленность на разработку методов автоматической обработки данных ДЗЗ, обеспечивающих полную воспроизводимость результатов картографирования;

– ориентированность на разработку адаптивных алгоритмов тематической обработки данных ДЗЗ, обеспечивающих локализованную оптимальную (само)настройку параметров в зависимости от пространственного расположения картографируемого объекта и времени проведения спутниковых наблюдений;

– применимость разрабатываемых методов для картографирования растительного покрова на больших территориях вплоть до глобального охвата (крупные страны, континенты и планета в целом);

– возможность формирования однородных временных рядов спутниковых карт, способных характеризовать динамику растительного покрова (концепция динамического картографирования).

Принципиально новый шаг в развитии методологии спутникового картографирования растительного покрова сопряжен с разработкой алгоритма локально-адаптивной классификации LAGMA (Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) [5]. В основе алгоритма лежит принцип пространственной локализации процессов обучения классификатора и распознавания типов земного покрова. Использование алгоритма позволяет обеспечить адаптивность классификатора к пространственным изменениям физико-географических условий картографируемой территории, как одного из требований, предъявляемых к методам обработки спутниковых данных на глобальном уровне. В отличие от ранее известных методов алгоритму LAGMA генетически присущ механизм учета пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик (или любых других признаков распознавания) земного покрова. Это обеспечивает возможность унифицированного картографирования растительного покрова больших территорий без необходимости предварительной стратификации. Указанная особенность метода LAGMA открывает потенциальную возможность его использования для создания карт растительного покрова любого, вплоть до глобального, географического охвата.

Выполненные разработки, реализованные в виде высокопроизводительных программных комплексов и автоматических технологий обработки спутниковых данных, позволили создать целый ряд тематических карт национального уровня, характеризующих структуру и характеристики растительного покрова России, включая такие, как: карта типов растительного покрова; карта используемых пахотных земель; карта преобладающих пород леса; карты запасов стволовой древесины в лесах; карты запасов углерода лесов и ряд других. При этом, реализуя предложенную концепцию динамического картографирования растительного покрова, составляющую одну из отличительных особенностей проводимых исследований и разработок, были сформированы ежегодные временные ряды перечисленных выше спутниковых карт, охватывающих период 2000–2021 годов и непрерывно обновляемых по мере сбора и обработки спутниковых данных. Анализ полученных временных рядов спутниковых карт позволил, в частности, выявить существенное сокращение покрытой лесом площади страны с начала текущего столетия, установить в динамике породной структуры лесов снижение доли хвойных и рост участия лиственных насаждений, исследовать масштабы и динамику пирогенных повреждений лесов, оценить бюджет углерода в лесных экосистемах России.

Разработанная методология космического картографирования растительного покрова, а также уникальный опыт создания на ее основе серии тематических карт, в настоящее время не имеют аналогов. Созданные карты находят широкое применение для решения целого ряда научных и практических задач, включая мониторинг и прогноз развития лесных пожаров, оценку степени повреждения лесов огнем и причиненного им ущерба, оценку среды обитания и учета численности диких животных, оценки биологического разнообразия лесов, мониторинг бюджета углерода наземных экосистем и оценки их способности по поглощению парниковых газов.

1. Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 N 3052-р «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» (http://government.ru/docs/43708/)

2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

3. *Барталев С.А., Лупян Е.А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 1. С. 197–214.

4. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А.* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.

5. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A.* A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. 5(1). P. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.

# ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД И БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ КАЧЕСТВА ВОД

*Н.А. Гашкина*

ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН», *г. Москва*
ngashkina@gmail.com

Химический состав вод малых озер более четко отражают зональную и региональную специфику условий его формирования, а также те антропогенные процессы, которые происходят в последнее время в окружающей среде притом в условиях изменяющегося климата. Природные циклы элементов претерпели существенные изменения вследствие человеческой деятельности. За последнее столетие изменения количеств включенных в оборот C, N, P приводят к значительному увеличению их стока в водоемы вследствие в первую очередь изменения землепользования [1]; наблюдается преобладание эмиссии кислотообразующих газов вследствие сжигания топлива и металлургии над природными источниками [2]; антропогенное поступление элементов в окружающую среду резко увеличилось, и оно связано с все возрастающими объемами добычи металлов и их рассеиванием [3].

На примере широкомасштабного исследований химического состава вод малых озер на территории Европейской части России показано влияние природных и антропогенных факторов на формирование химического состава вод [4]. Анализ показал, что антропогенный фактор, накладываясь на природные процессы, оказывает существенное влияние на них, стимулируя процессы эвтрофирования, закисления, а также обогащения вод токсичными микроэлементами. По расчетам коэффициентов миграции элементов в целом пресные воды Восточно-Европейской равнины характеризуют высокие коэффициенты концентрации Mo, As, U, Bi, Sb, Cd, Ag, Se, Re, которые, главным образом, обусловлены антропогенной нагрузкой на водосборы.

Исследовано влияние климатических изменений на химический состав вод и развитие таких неблагоприятных процессов, как засоление и эвтрофирование; построены модели для расчета интегральных показателей (сумма ионов и общий фосфор) [5]. По прогнозу достаточно ощутимый рост суммы ионов (на около 25%) будет только в средней и южной частях Европейской части России при росте температур на 2°C, тогда как значительный рост общего фосфора (на около 50%) будет наблюдаться повсеместно за исключением тундры и лесотундры уже при повышении среднесуточных температур на 0.5 ºC.

Влияния антропогенной изменчивости на химический состав вод озер исследовано на примере воздействия металлургический и горнодобывающий предприятий. На основе анализа динамики химического состава вод построены модели и определены ответные реакции на воздействие кислообразующих веществ [6]. По прогнозу изменение выбросов диоксида серы комбинатом «Печенганикель» только лишь на 20% не приведет к существенным изменениям концентрации сульфатов в воде озер, которая на порядок выше регионального уровня. В случае снижения выбросов комбинатом «Североникель» химический состав вод озер, приближенных к нему, будет и дальше восстанавливаться. В зоне снижения нагрузок для геологически-обусловленных уязвимых озер дальнейшее уменьшение содержания катионов в воде повлечет за собой дальнейшее развитие процесса закисления вод.

Исследования подтверждают, что рыба является хорошим индикатором состояния водной среды и экосистем, особенно в случаях токсического загрязнения воды; притом показано, что на основании сходства патологических процессов и биоаккумуляции металлов в организме рыб и человека исследование содержания элементов в рыбе может быть использовано для оценки потенциального риска для здоровья человека [7]. Выявлены особенности биоконцентрирования элементов в органах и тканях рыб, в том числе антагонистические эффекты в условиях техногенных провинций (зона влияния Карабашского медеплавильного производства) по сравнению с фоновыми [8]. Построены модели перераспределения элементов в печени и почке рыб в зависимости от физиологического состояния по водоемам с сильной изменчивостью токсичности среды обитания [9]. Показано, что в условиях комплексного загрязнения и/или хронического действия субтоксичных доз токсичных веществ эссенциальные элементы могут служить маркерами интенсивности и направленности метаболических процессов и микроэлементных нарушений в организме рыб, что имеет исключительное значение для исследований последствий загрязнения и оценки качества вод. Снижение токсичной нагрузки на оз. Имандра дало уникальную возможность выявить особенности метаболизма металлов и их адаптивные механизмы регуляции [10].

Изучено влияние температурного фактора на проникающую способность, метаболизм и биоаккумуляцию элементов в органах и тканях рыб на примере условий теплового загрязнения Кольской АЭС субарктического оз. Имандра как уникальной природной модели теплового воздействия [11].


1. *Lerman A., Mackenzie F.T., May Ver L.* Coupling of the perturbed C-N-P cycles in industrial time // Aquatic Geochemistry. 2004. 10. P. 3–32.

2. *Rodhe H., Landgner J., Gallardo L., Kjellstrom E.* Global scale transport of acidifying pollutants. // Water, Air and Soil Pollution, 1995. V. 85. P. 37–50.

3. *Pacyna J.M., Pacyna E.G.* An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. // Environmental Reviews, 2011. V. 9. № 4. P. 269–298.

4. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука, 2010. 268 с.

5. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Хорошавин В.Ю.* Прогноз возможного потепления климата на химический состав вод суши // Доклады Академии наук, 2011. Т. 441. № 5. С. 666–669.

6. *Гашкина Н.А., Моисеенко Т.И.* Влияние выбросов медно-никелевых производств на химический состав вод озер: прогноз закисления // Доклады Академии наук, 2017. Т. 476. № 2. С. 217–223.

7. *Moiseenko T.I., Morgunov B.A., Gashkina N.A., Megorskiy V.V., Pesiakova A.A.* Ecosystem and human health assessment in relation to aquatic environment pollution by heavy metals: case study of northwest of the Russian arctic, Kola peninsula // Environmental Research Letters, 2018. V. 13. № 6. P. 065005.

8. *Гашкина Н.А., Таций Ю.Г., Удачин В.Н., Аминов П.Г.* Биогеохимическая индикация загрязнения окружающей среды (на примере влияния крупного медеплавильного комбината) // Геохимия, 2015. № 3. С. 264–275.

9. *Гашкина Н.А.* Эссенциальные элементы в органах и тканях рыб в зависимости от токсичности среды обитания и физиологического состояния // Геохимия, 2017. № 10. С. 934–941.

10. *Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Kudryavtseva L.P.* Fish response of metal bioaccumulation to reduced toxic load on long-term contaminated Lake Imandra. // Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020. V. 191. P. 110205.

11. Gashkina N.A., Moiseenko T.I. Influence of Thermal Pollution on the Physiological Conditions and Bioaccumulation of Metals, Metalloids, and Trace Metals in Whitefish (*Coregonus lavaretus* L.). // International Journal of Molecular Sciences, 2020. V. 21. № 12. P. 4343.

# ЕВРАЗИЙСКИЕ МЕТАМОРФОЗЫ СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ: ОБЩЕСТВЕННО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

*А.Г. Дружинин*

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», *г. Ростов-на-Дону*
alexdru9@mail.ru

Россия, её обширное и сложно структурированное пространство, многоаспектные факторы и тенденции его динамики – для отечественных географов-обществоведов традиционно выступают приоритетной сферой [1], в последние три десятилетия всё в возрастающей мере исследуемой с опорой на «евразийские» концепты, идеи, подходы [2]. Опора на них предполагает видение: 1) статуса России как одной из ключевых территориально-обособленных, целостных составляющих миропорядка; 2) сопряжённости нашей страны и её евразийского «пояса соседства»; 3) евро-азиатской специфики Российской Федерации, в том числе возможностей и рисков её географического (экономического, транспортного, геополитического) положения; 4) совокупности российских регионов как «единства разного» в структурно-экономическом, этнодемографическом, ментальном и иных аспектах; 5) необходимости культивирования россиеориентированной географической картины мира.

В складывающейся с 1992 года архитектуре глобального миропорядка евразийское пространство «сжималось» и, одновременно (в русле экспансии внешних для постсоветских государств геополитических акторов) – «расширялось», что идентифицировано как формирование *многополюсной Евразии* [3], характеризуемой нарастающей фрагментацией, турбулентностью, транзитом социально-экономических свойств, инновационными заимствованиями и геостратегическим переделом. С появлением новых независимых государств многое из ранее «внутреннего» проявило себя для России в качестве её «внешнего», потребовав в том числе сфокусированного внимания не только к видоизменившим свою конфигурацию политико-географическим границам, к процессам трансграничной социально-экономической и геополитической регионализации [4, 5]), но и к более «глубинным» и устойчивым этнокультурным рубежам. Соответствующий подход реализован в процессе разработки *концепции геоэтнокультурной системы* [6], ставшей одной из базовых компонент предложенной автором *методологии культурно-географического анализа*, апробированной на российском эмпирико-фактологическом материале.

Включаясь в процессы глобализации, постсоветская Россия в превалирующей мере фокусировала свои интересы в пределах именно Евразии (до 94 % российского внешнеторгового оборота и 95 % выездного турпотока устойчиво ориентировано именно на государства евразийского материка). Интернационализация российской экономики сопровождалась, при этом, не только ощутимым «притяжением к морю» производства, инфраструктуры и населения, но и общим ростом морехозяйственной активности (в частности, с 1995 г. грузооборот морских портов страны вырос в 8 раз), дополняемым опережающим развитием важнейших приморских зон, формированием аква-территориальных структур. Предельно значимым, при этом (в русле общего необходимого «поворота» отечественного географического сообщества к тематике Мирового океана [7, 8]), оказался и учёт *воздействия «фактора моря» на территориальную организацию российского общества, дополняемый оценкой влияния геополитических и геоэкономических изменений в современной Евразии на*

*«мореориентированность» Российской Федерации*, её регионов, корпораций (тематика, разрабатываемая автором в рамках трёх грантов РНФ[9]).

Меняющаяся, обретающая полицентричность Евразия, равно как и новое положение в ней России (продуктивно осмысливаемое отечественными географами в связи с концептом «Большой Евразии» [10, 11]) предполагает также последовательную реализацию «многорумбового» подхода к исследованию и развитию российского пространства, когда задачи «разворота на Восток», либо расширения российского присутствия в Арктике – призваны дополняться проблематикой, ориентированной на дальнейшее развитие центрального исторического ядра страны, обустройство нашего западного порубежья, а также реализацию Российской Федерацией «южного вектора» своей геостратегии.

Как свидетельствуют проводимые нами в течение трёх десятилетий исследования, российский юг (фактически – юго-запад, с середины 1990-х обозначаемый преимущественно топонимом «Юг России» [12]) правомерно рассматривать в качестве полномасштабно включённого в общеевразийские процессы целостного (но поликомпонентного) макрорегиона, демонстрирующего значимые агропромышленные (до 40 % сельхозпроизводства РФ), транспортно-логистические (треть грузооборота морских портов страны) и селитебно-демографо-воспроизводственные функции. Сама же «южная тематика» (с февраля 2022 г. вновь резко актуализированная) должна системно разрабатываться в рамках междисциплинарного исследовательского направления, которое (с учётом предметно-объектной специфики и основополагающих методологических подходов) уместно обозначить как «*геостратегическое российское юговедение*».


1. *Саушкин Ю.Г.* Географическая наука в прошлом, настоящем, будущем. М.: Просвещение. 1980. 269 с.

2. *Дружинин А.Г.* Идеи классического евразийства и современность: общественно-географический анализ. Ростов-на-Дону. Изд-во Южного федерального университета. 2021. 270 с.

3. *Дружинин А.Г.* Россия в многополюсной Евразии: взгляд географа-обществоведа. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. 228 с.

4. *Тулохонов А.К., Болданов Т.А.* Политическая география российского пограничья в условиях глобализации: теория, вызовы, решения // Регион: Экономика и Социология. 2021. № 1 (109). С. 203–235

5. *Бакланов П.Я.* Тихоокеанская Россия: географические и геополитические факторы развития // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015, № 5. С. 8–19

6. *Дружинин А.Г.* Теоретические основы географии культуры. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 1999. 114 с.

7. *Нигматулин Р.И.* Океан, ресурсы, природные катастрофы // Вестник Российской академии наук. 2010. Т.80. № 8. С. 675–689.

8. *Матишов Г.Г., Матишов К.Д., Кириллова Е.Э.* Российская океанология и перспективы освоения ресурсов Мирового океана // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 509–512

9. *Дружинин А.Г.* «Морская составляющая» российской общественной географии: традиции и новации // Известия РАН. Серия географическая. 2016. С. 10–19

10. *Котляков В.М., Шупер В.А.* Россия в Большой Евразии: задачи на XXI век // Россия в формирующейся Большой Евразии /под ред. В.М. Котлякова и В.А. Шупера. Вопросы географии. Вып. 148. М.: Издательский дом «Кодекс». 2019. С. 357–372

11. *Дружинин А.Г.* Евразийские приоритеты России (взгляд географа-обществоведа). Ростов-на-Дону. Изд-во Южного федерального университета. 2020. 268 с.

12. *Дружинин А.Г.* Глобальное позиционирование Юга России: факторы, особенности, стратегии. Ростов-на-Дону: Из-во ЮФУ. 2009. 287 с.

# ПОСТСОВЕТСКИЕ НЕПРИЗНАННЫЕ ГОСУДАРСТВА: ФАКТОРЫ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ И РИСКИ ДЛЯ РОССИИ

*В.А. Колосов*

ФГБУН «Институт географии РАН», *г. Москва,*
kolosov@igras.ru

Конфликты на постсоветском пространстве, возникшие вследствие политической дезинтеграции и кризиса государственности в Молдавии, Азербайджане, Грузии и на Украине, создают для России существенные угрозы безопасности. Непризнанные и частично признанные государства (в дальнейшем НГ) можно рассматривать как частный случай фрагментации мирового политического пространства и один из видов неконтролируемых территорий (НТ). Разработанная при участии автора типология НТ опирается на представления о контроле над территорией. Выявлена связь между степенью контроля над территорией, разнообразием его видов, устойчивостью и территориальным рисунком. На основе собранной базы данных о НТ в мире составлена серия карт, отражающих локализацию, динамику, происхождение, источники существования и другие особенности НТ. Свыше 90% общей площади и населения НТ в мире приходится на обширные зоны проблемной государственности в Азии и Африке, где соответственно 17 и 19% территории в последние годы не контролировалось легитимными правительствами. Там проживало соответственно 44,7 млн и 138,2 млн чел. Проведена балльная оценка факторов жизнеспособности 38 НТ. На общем фоне жизнеспособность постсоветских НГ оценивается как средняя или выше средней.

Важнейший показатель устойчивости и состоятельности НГ – динамика численности населения. Массовый исход жителей стал крупной проблемой Приднестровья, Южной Осетии и донбасских республик. Оценки численности населения ДНР и ЛНР варьируют в широких пределах. Сопоставление расчетов, выполненных разными методами, и сравнение по космическим снимкам ночной освещенности территории за разные годы позволяют заключить, что потери составили не менее 50%. Сокращение населения большинства НГ определяется не только миграцией, но и естественной убылью. Следствия депопуляции – деформация половозрастной структуры, свертывание налоговой базы и внутреннего спроса, структурный кризис на рынке труда. Депопуляция подрывает внутреннюю легитимность политических режимов и способствует социальному расслоению.

Низкие зарплаты и пенсии вынуждают граждан НГ искать дополнительные источники дохода в соседних государствах – вахтовую работу, пособия и т.д. Жители НГ ездят в соседние страны также за потребительскими товарами, медицинскими и иными услугами. Направление трансграничных поездок определяется близостью и режимом границы, условиями работы, наличием гражданства соответствующего государства, родственными связями.

Результаты государственного строительства в постсоветских НГ неоднозначны. Им удалось обеспечить контроль над своими территориями, монополизировать такие ключевые государственные функции, как охрана правопорядка и сбор налогов, создать государственный аппарат и относительно устойчивые политические системы. Они до настоящего времени оказались способны стабильно функционировать после смены власти путем выборов или переворотов. В то же время возможности постсоветских НГ удовлетворить социальные и экономические потребности населения оказались скромными.

Внутренний суверенитет НГ в большой степени зависит от их способности обеспечить население рабочими местами и достойным уровнем доходов и общественных услуг. Экономические трудности НГ вызваны отсутствием политического статуса, сужающим диапазон возможностей внешнеэкономической и финансовой деятельности, конфликтными отношениями с материнскими государствами, ограниченными внутренними ресурсами, а также сращиванием власти и бизнеса, борьбой кланов. Результатом стало отставание по ВВП на душу населения по паритету покупательной способности и от соседних стран в целом, и от их периферийных приграничных регионов. Несмотря на отдельные успехи, для НГ типичны крупный внешний долг и дефицит государственного бюджета, зависимость от нескольких неустойчиво работающих предприятий, формирование части ВВП за счет займов и переводов мигрантов из-за рубежа, недостаток инвестиций, логистические трудности. Бюджет НГ критически зависит от финансовых поступлений и другой помощи от государства-патрона.

Стремление к международному признанию – это не только легитимизация статуса де-факто государства, но и мощный нарратив, закрепляющий общую политическую идентичность. Как показал анализ официального и медийного дискурса в постсоветских НГ и материалы проведенных фокус-групп, геополитическая картина мира в социальных представлениях граждан похожа. Во-первых, центральное место в этой картине занимает Россия. Ее не идеализируют, но уважают и ценят. Граждане хорошо осведомлены о зависимости республик от российской помощи, поддержки и покровительства. Материнские государства в соответствии с официальным и медийным дискурсом воспринимаются как марионеточные и зависимые от запада. При этом многие респонденты пользуются их инфраструктурой, отмечают определенные успехи в их развитии и хотели бы установить с ними нормальные отношения при условии признания своей республики. Выросло число людей, в первую очередь более образованных, активных и мобильных, у которых наблюдается некоторая эрозия ценностей суверенитета, особенно в Приднестровье.

Изучение эволюции российского политического дискурса о постсоветских НГ на основе собранной базы данных выявило его зависимость от нарастания противоречий между Россией, ЕС и НАТО, ухудшения отношений России с Молдовой, Грузией и Украиной. Контекстная связанность дискурса о НГ подтверждается количественными измерениями. С началом военных действий в Донбассе в 2014 г. официальный, левый и националистический дискурсы о НГ фактически слились. В правом (либеральном) дискурсе доминирует идея пагубности российской политики в отношении соседних стран, которая создает условия для гражданских конфликтов. Мнения россиян о НГ в основном следуют официальному дискурсу, однако находятся на периферии общественного внимания.

Соседство с Абхазией, Южной Осетией, ЛНР и ДНР имело противоречивые последствия для российских регионов. С одной стороны, оно придавало некоторые импульсы экономике. Низкий уровень развития услуг в НГ побуждает их жителей пользоваться инфраструктурой приграничных регионов России, где за счет привлеченного спроса расширяется рынок сбыта. С другой стороны, соседство с НГ способствовало распространению в приграничных регионах нелегального автобизнеса, контрабанды наркотиков и сигарет, провоза товарных партий продуктов без таможенного оформления и т.д. Риски военной эскалации требуют усиления контроля и мер обеспечения национальной безопасности, усложняющих жизнь местного населения.

Для России основной риск существования и поддержки НГ заключались во втягивании в прямые вооруженные конфликты в Нагорном Карабахе и до 24 февраля

2022 г. – в Донбассе. К рискам ухудшения внутреннего положения относятся политическая нестабильность в НГ, чреватая террористической угрозой, незаконным оборотом оружия, проникновением криминальных элементов, негативным влиянием на межэтнические отношения, увеличением нагрузки на российский бюджет. На некоторые риски РФ может влиять лишь косвенно. К ним принадлежат низкие темпы развития экономики НГ, ухудшение имиджа России на фоне ее низкой экономической привлекательности и ослабления «мягкой силы» и, как следствие, – размывание ценности достигнутого суверенитета. На локальном уровне политическая нестабильность и потенциальное обострение конфликта между НГ и материнскими государствами порождает риски притока мигрантов и дестабилизации рынка труда в соседних регионах, ухудшения бизнес-климата, рост социальных фобий населения.

# ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И АНТРОПОГЕННОЙ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА МУССОННОЙ ОБЛАСТИ БАССЕЙНА АМУРА

*М.В. Крюкова*
ФГБУН «Институт водных и экологических проблем ДВО РАН», *г. Хабаровск*
flora@ivep.as.khb.ru

Бассейн р. Амур расположен на восточной окраине Азии в зоне активного взаимодействия материка и Тихого океана. Специфика природно-климатических условий бассейна Амура обусловливается цикличными многолетними сменами засушливых и влажных периодов, разной степенью океанического и континентального влияния на востоке и западе бассейна, наличием горных систем, расположенных перпендикулярно муссонному движению воздушных масс, высокой контрастностью природных факторов, сочетанием природных рубежей высокого ранга, в том числе разных по генезису фратрий растительных формаций (охотско-камчатская, ангаридская, амурская, берингийская, восточно-сибирская). Воздействие теплых и влажных муссонов в летний период позволяет теплолюбивым формациям хвойных и хвойно-широколиственных лесов развиваться в долине р. Амур на северо-восток и запад в глубь континента.

Положение территории в составе бореально-неморального экотона Восточной Азии определяет разнообразие таксономической и эколого-географической структур растительного покрова. Видовое разнообразие представлено 2959 видами сосудистых растений из 848 родов и 162 семейств [1–6]. Типологическая структура флоры характеризует ее как арктобореально-восточноазиатскую с лугово-горными чертами. Самобытность флоры определяется наличием центров автохтонного развития растительного покрова, эндемичных (1,8 % видового разнообразия) и реликтовых (35 %) видов, формирование и становление которых связано с природно-историческим развитием бассейна.

Зональность свойственна лесному комплексу, который включает группы светлохвойных, темнохвойных, хвойно-широколиственных, широколиственных, мелколиственных и других типов лесов. Климатические условия голоцена способствовали развитию на горных склонах и равнинах бореальных типов растительного покрова – темнохвойных и светлохвойных лесов, представленных в видовом разнообразии берингийского, охотско-камчатского и восточносибирского флороценогенетических комплексов. Их основу образуют виды сибирско-дальневосточной, дальневосточной ареалогических групп. В южных районах распространены теплолюбивые формации неморальных широколиственных и хвойно-широколиственных лесов, ядром которых являются виды амурского флороценогенетического комплекса, представленные амурской и амуро-японской ареалогическими группами.

Слабее представлены в растительном покрове луговой и болотный комплексы, занимающие интразональное положение в муссонной области бассейна Амура. Дизъюнктивный характер распространения, не подчиняющийся общим зональным закономерностям характерен для ценотических комплексов, приуроченных к азональным элементам ландшафтов – скальным выходам, озерам, рекам и др.

Современный этап развития растительного покрова отличается высокими темпами изменения многих факторов, определяющих условия существования растительного покрова, в том числе природных и антропогенных, их комплексным характером воздействия. Крупномасштабное освоение территории Приамурья привело к разрыву ареалов многих реликтовых, эндемичных видов растений и их сообществ, снижению флористического, регионального экологического разнообразия биогеоценозов, усилению

процессов синантропизации растительного покрова, преобразованию и разрушению исторически сложившихся экосистем, местообитаний, усилению экологических рисков. Непропорциональная нагрузка на экосистемы нарушает межэкосистемные связи, усиливает контрастность среды. Возрастает количество и разнообразие новых экотонов и формирующихся молодых экотонных экосистем, в целом, усиливается экотонизация растительного покрова.

Факторы риска для фитогенофонда Приамурья представлены крупномасштабными лесными рубками и пожарами, сплошной распашкой земель Зейско-Буреинской, Среднеамурской, Приханкайской низменностей, расширением дорожной инфраструктуры, сети линейных сооружений, горнопромышленных разработок и т.д.

Оценка степени трансформации растительного покрова рассматриваемой территории позволила выделить четыре уровня его экологического состояния: катастрофическое, критическое, напряженное и удовлетворительное.

Выделенные зоны катастрофического и критического уровней состояния растительного покрова приурочены к наиболее освоенным южным районам Приамурья, городским агломерациям. Большая часть бассейна Амура характеризуется напряженным и удовлетворительным уровнем экологического состояниями, сохранению которых благоприятствует малая доступность этих территорий.

Для соблюдения баланса в эколого-экономическом развитии Приамурья и рационального использования растительных ресурсов необходимы объективная инвентаризация природных ресурсов, ландшафтно-экономическое планирование территории на уровне субъектов Федерации, объективная оценка состояния особо охраняемых природных территорий и их оптимизация. Важным элементом планирования рационального природопользования должны стать Стратегия о сохранении биологического разнообразия, Положение о государственном мониторинге природной среды в области биологического разнообразия, порядок ведения кадастра данных по биологическому разнообразию в регионах России

1. *Кожевников А.Е.* Эндемичный элемент во флоре российского Дальнего Востока // Комаровские чтения. - Владивосток: Дальнаука, 2007. Вып. LIV. С. 8–81.

2. *Кожевников А.Е., Кожевникова З.В.* Флора бассейна реки Амур (российской Дальний Восток): таксономическое разнообразие и пространственные изменения таксономической структуры // Комаровские чтения. - Владивосток: Дальнаука, 2007. Вып. LV. С. 104–183.

3. *Крюкова М.В.* Сосудистые растения Нижнего Приамурья. – Владивосток: Дальнаука, 2013. 354 с.

4. *Старченко В.М.* Флора Амурской области (состав, анализ, вопросы охраны). Автореф. дисс… докт. биол. наук. - Владивосток, 2008. 36 с.

5. *Шлотгауэр С.Д., Крюкова М.В., Антонова Л.А.* Сосудистые растения Хабаровского края и их охрана. - Владивосток-Хабаровск: ДВО РАН, 2001. 195 с.

6. *Kozhevnikov A.E., Kozhevnikova Z.V., Kwak M., Lee B.Y.* Illustrated flora of the Primorsky territory (Russian Far East).Incheon: National Institute of Biological Resources, 2019. 1124 p.

# БУДУЩЕЕ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ДРЕЙФУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АРКТИКЕ

*А.С. Макаров*

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», *г. Санкт-Петербург*
makarov@aari.ru

Активное изучение и освоение Арктического региона, необходимость отслеживания экологического состояния Северного Ледовитого океана (СЛО), его высокоширотных архипелагов и прибрежных областей, и, при этом, высокая восприимчивость природной среды Арктики к климатическим сдвигам и антропогенным воздействиям выводят на первый план в сфере исследований северной полярной области задачу организации мониторинга системы атмосфера — суша — ледяной покров — океан по всему комплексу метеорологических, ледовых, гидрофизических, геохимических, гляциологических, геофизических, биологических и других параметров. Результаты такого мониторинга явятся основой для совершенствования как технологии слежения за состоянием СЛО и его отдельных районов, так и методов прогноза погоды и климата Арктики.

Существуют долгопериодные изменения климата полярной системы, природа которых относительно мало изучена. Наряду с ярко выраженным потеплением нижних слоёв атмосферы в последние десятилетия наблюдаются также увеличение интенсивности приповерхностных инверсий и концентрации парниковых газов, положительная аномалия температуры атлантических вод, поступающих в Центральный арктический бассейн СЛО, сокращение площади многолетних морских льдов. Неясно, в какие именно сезоны происходит перестройка ледово-гидрологического режима в Арктическом бассейне и как она связана с метеорологическими процессами. Исследования последних лет указывают на существенную роль внутригодовых циклов в формировании межгодовой (климатической) изменчивости СЛО, особенно макромасштабной изменчивости его ледового и гидрологического режимов. При этом летние и зимние процессы в арктических морях и Арктическом бассейне в целом по-разному влияют на перенос и трансформацию веществ природного и антропогенного происхождения, поступающих с речным стоком и из атмосферы, биологические, седиментационные и газообменные процессы в Арктическом регионе.

Важнейшим звеном в отечественных исследованиях регионов, покрытых большую часть года ледяным покровом, являлась деятельность, связанная с организацией дрейфующих станций и ледовых лагерей. Дрейфующие станции «Северный Полюс» (1937, 1950–1991, 2003–2013), Высокоширотная экспедиция «Север» (1937, 1941–1993) обеспечили сбор уникальных данных по батиметрии, температуре, солёности, течениям СЛО, в ходе реализации этих масштабных проектов в ААНИИ был наработан колоссальный опыт проведения исследований с базированием на дрейфующем морском льду. Деградация ледяного покрова, явившаяся следствием климатических изменений, происходивших в последние десятилетия, в том числе, привела к свёртыванию программы работ дрейфующих станций в годовом цикле, осталась возможность организации только сезонных дрейфующих станций в зимне-весенний период. Количество многолетних льдов толщиной 2–3 м, пригодных для организации дрейфующих станций, существенно уменьшилось. Динамические процессы в ледяном покрове стали более интенсивными, значительно увеличилась вероятность разломов ледовых полей. Указанные обстоятельства практически исключают возможность обнаружения надежной ледовой

платформы, пригодной для организации полномасштабной станции, рассчитанной на годичную эксплуатацию. Для продолжения и развития комплексных научных исследований в высоких широтах Северного Ледовитого океана в настоящее время реализуется инновационный проект по созданию плавучей ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) с высокой прочностью корпуса, пригодной к использованию в качестве базы дрейфующих научно-исследовательских станций «Северный полюс». ЛСП будет способна функционировать в автономном режиме в течение 2 лет, обеспечивая выполнение комплекса исследований, спектр которых может быть значительно расширен относительно стандартного для традиционных дрейфующих станций «СП», возможности которых были ограничены техническими условиями базирования на дрейфующем льду.

Возобновление программы дрейфующих станций «Северный полюс» на базе ледостойкой платформы позволит выполнять весь комплекс наблюдений за состоянием природной среды высокоширотной Арктики от геологического строения дна СЛО до верхней атмосферы. Первый рейс ЛСП должен состояться в 2022г. Осенью 2020 г. отправится экспедиция «Северный полюс 41».

Наиболее перспективным направлением использования ЛСП для комплексного оценивания состояния природной среды Арктики представляется её включение в качестве высокоширотного узла в сеть российских обсерваторий, в настоящее время включающую научно-исследовательский стационар «Ледовая база «Мыс Баранова» (НИС «Мыс Баранова»), российский научный центр на архипелаге Шпицберген (РНЦШ) и гидрометеорологическую обсерваторию Тикси (ГМО Тикси). Ввод в строй ЛСП обеспечит возможность возобновления скоординированного мониторинга состояния природной среды Арктического региона в наиболее характерных районах Арктики: Центральный Арктический бассейн, основной определяющей компонентой которого является наличие дрейфующего морского ледяного покрова (ЛСП); западное побережье архипелага Шпицберген, гидрометеорологический режим которого в значительной степени обусловлен влиянием Атлантики (РНЦШ); остров Большевик на архипелаге Северная Земля – идеальный полигон для исследований всех элементов криосферы и геофизических процессов (НИС «Мыс Баранова»); находящийся на трассе Северного морского пути район дельты реки Лена – один из возможный районов экстремального поступления парниковых газов в атмосферу вследствие таяния наземной и подледной вечной мерзлоты (ГМО Тикси).

Создание Арктической пространственно-распределенной обсерватории, объединяющей НИС «Мыс Баранова», РНЦШ, ГМО Тикси и, в перспективе, ЛСП, как структуры, оптимизирующей организацию исследовательских работ на объектах арктической обсервационной инфраструктуры Росгидромета, в полной мере соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

# ECOMAG – ПЛАТФОРМА ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

*Ю.Г. Мотовилов*

ФГБУН «Институт водных проблем РАН», *г. Москва*
motol49@yandex.ru

В докладе представлена разработанная автором моделирующая платформа (МП) ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics) – первая отечественная и одна из первых в мире технологий для исследований, расчетов и прогнозов гидроэкологических характеристик состояния речных бассейнов. Методическая база МП ECOMAG заложена в 1980-е годы, когда автором были получены первые на тот период в мире результаты в области физико-математического моделирования процессов формирования весенне-летнего половодья – основной фазы водного режима большинства рек России. Предложены первые физически обоснованные количественные методы оценки изменений речного стока под влиянием хозяйственной деятельности (распашка, вырубка леса) и изменения климата [1, 2].

Развитие МП ECOMAG было продолжено в 1990-е годы, когда автором были разработаны новые методы количественного описания в моделях пространственной вариабельности характеристик ландшафтов: рельефа, физических и химических свойств почвенного и растительного покровов с привлечением современных средств геоинформационного обеспечения. Катализатором развития модели стало участие автора в подготовке и проведении масштабных экспедиционных и стационарных полевых исследований в Швеции в рамках междисциплинарного международного эксперимента NOPEX (NOrthern hemisphere climate Processes land-surface EXperiment) в 1994–1995 гг. [4].

Создание МП ECOMAG было завершено автором в 2000-х годах. Сегодня это высокотехнологичная моделирующая платформа, которая объединяет физически обоснованные модели гидрологического и гидрохимического циклов речных бассейнов, автоматизированные методы обработки пространственно-распределенных данных о рельефе, видах землепользования, типах почв и растительности, загрязняющих веществ, а также гидрометеорологической и водохозяйственной информации. МП ECOMAG прошла успешные испытания на десятках речных бассейнов Земного шара площадью от десятков до миллионов квадратных километров, расположенных в разных физико-географических и климатических условиях [3]. Показано, что модель позволяет с высокой точностью и с детальным пространственно-временным разрешением воспроизводить изменения гидрологических и гидрохимических характеристик по территории речных бассейнов за период инструментальных наблюдений, прогнозировать изменения этих характеристик с заблаговременностью от нескольких суток до нескольких месяцев, оценивать влияние хозяйственной деятельности и изменения климата на гидроэкологическое состояние речных бассейнов и связанные с ним социально-экономические факторы.

В докладе представлены основные фундаментальные результаты, полученные с применением МП ECOMAG:

– разработаны региональные гидрологические модели для крупнейших речных бассейнов северного полушария (Волги, Лены, Амура, Северной Двины, Печоры, Мезени, Таза, Пура, Надыма, Колымы, Ангары, Селенги, Маккензи, Роны и др.), которые

позволяют рассчитывать динамику полей характеристик гидрологического цикла: речного стока, снежного покрова, суммарного испарения, влажности и глубины промерзания почвы в различных физико-географических зонах, при широком разнообразии условий формирования стока, типов питания и гидрологического режима водных объектов [3];

– создана модель формирования качества воды на речном водосборе, на основе которой разработаны методы исследования (1) полей химического стока загрязняющих веществ с водосбора в речную сеть, (2) источников диффузного загрязнения водных объектов, в том числе (3) для выявления локальных участков водосборов, не охваченных гидрохимическими наблюдениями, со значительными уровнями загрязнения рек, ассоциированных с территориями накопленного экологического ущерба [5];

– предложен новый метод решения классической гидрологической задачи – анализа генетической структуры речного стока, состоящей в разделении вклада поверхностной, внутрипочвенной и грунтовой составляющих речного стока.

– Представлены разработанные автором методы решения актуальных задач прикладной гидроэкологии и результаты внедрения МП ECOMAG в оперативную практику принятия решений по управлению водохозяйственным комплексом:

– разработана и с 2004 г. внедрена в оперативную практику Росводресурсов технология информационной поддержки принятия решений по регулированию стока крупнейшими водохранилищами Волжско-Камского и Ангаро-Енисейского каскадов. Технология объединяет МП ECOMAG с моделью функционирования водохозяйственных систем VOLPOW (разработчик С.Е. Беднарук) и стала первой в нашей стране автоматизированной технологией для экономически обоснованного и экологически безопасного управления водными ресурсами речных бассейнов с каскадами водохранилищ комплексного назначения;

– предложены методы долгосрочных ансамблевых прогнозов притока воды к водохранилищам с заблаговременностью несколько месяцев и краткосрочных прогнозов притока воды в водохранилища с заблаговременностью несколько суток, которые прошли оперативные испытания в Росгидромете и РусГидро;

– разработаны методы оценки опасности формирования и распространения наводнений с учетом влияния действующих и проектируемых водохранилищ и поддержки принятия решений при управлении риском наводнений на среднем Амуре (в стадии опытной эксплуатации);

– решена проблема гидрографического и водохозяйственного районирования территории РФ и опубликовано 19 атласов с географическим описанием гидрографических единиц и водохозяйственных участков, утвержденных приказами МПР России и Росводресурсов в качестве нормативных документов.

1. *Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г.* Формирование речного стока (Физико-математические модели). М.: Наука, 1983, 216 с.

2. *Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А.* Чувствительность гидрологических систем: влияние антропогенных изменений речных бассейнов и климата на гидрологический цикл. М.: Наука, 1990. 144 с.

3. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.

4. *Motovilov Yu.G., L.Gottschalk, K.Engelandand A.Rodhe.* Validation of a distributed hydrological model against spatial observation. Agricultural and Forest Meteorology. 1999, 98–99, pp.257–277.

5. *Motovilov Yu., Fashchevskaya T.* Modeling Management and Climate Change Impacts on Water Pollution by Heavy Metals in the Nizhnekamskoe Reservoir Watershed. Water. 2021, *13*, 3214. https://doi.org/10.3390/w13223214

# ФЛЮВИАЛЬНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ПАЛЕОГИДРОЛОГИЯ РАВНИН СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В КОНЦЕ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ПЕРИОДА

*А.В. Панин*

ФГБУН «Институт географии РАН», *г. Москва*
a.v.panin@igras.ru

Флювиальный рельеф районов гумидного умеренного климата традиционно интерпретировался в рамках парадигмы возможных изменений увлажнения и стока лишь в сторону аридизации. Значительный рост объемов стока предполагался лишь за счет таяния ледников и межбассейновых переливов в результате ледникового подпруживания рек. Ледниковым стоком большинство исследователей объясняло раннехвалынскую трансгрессию Каспия в конце позднего плейстоцена. На фоне достигнутого в последние десятилетия значительного прогресса в палеоклиматических реконструкциях, назрела необходимость в ревизии представлений о развитии флювиальных геоморфологических систем и их реакции на изменения климата.

Прогресс в области истории флювиального рельефообразования сдерживался ненадежностью геохронологической основы в масштабах времени $10^3$–$10^4$ лет. Эти проблемы удалось преодолеть путем внедрения с начала 2000-х гг в практику исследований массового применения новых технологий датирования – масс-спектрометрической разновидности радиоуглеродного метода и люминесцентных методов [2]. В последние три десятилетия в понимании истории флювиальных геоморфологических ландшафтов равнин умеренного климатического пояса Северной Евразии и формировавшего их стока воды достигнут значительный прогресс.

1. Показано, что эрозионно-аккумулятивные ритмы последних межледниково-ледниковых циклов управлялись климатически обусловленными изменениями стока воды [4, 6, 7]. Выявлены фазы кратного (по отношению к современному) роста стока, которым соответствовали фазы углубления долинно-балочной сети, рост густоты эрозионного расчленения: московское позднеледниковье (конец МИС 6), конец интерстадиальной эпохи МИС 3 (~40–28 тыс.л.н.), валдайское (сартанское) позднеледниковье (конец МИС 2, 18–13 тыс.л.н.).

2. Установлены различия в гидроклиматических режимах холодных и теплых эпох 100-тысячелетнего климатического цикла. Амплитуда колебаний не только температур, но и водного стока в ледниковые эпохи значительно больше, чем в межледниковья. Фазовые соотношения обоих типов колебаний - противоположны. В ледниковые эпохи рост стока происходит в периоды относительного потепления (межстадиалы), падение – в периоды похолодания. В межледниковье рост стока соответствует похолоданиям, падение – потеплениям.

3. На основании уточненной хронологии фаз углубления и выполнения долиной сети, с учетом региональной специфики построены типовые схемы строения крупных и малых долин (балок) Восточно-Европейской равнины (ВЕР) [6, 10]. Основное отличие от предшествующих представлений – удревнение возраста низких террас, выявление глубоких предголоценовых врезов.

4. Метаанализ данных абсолютной геохронологии позволил выявить в голоцене ВЕР чередование фаз повышенной и пониженной флювиальной активности, особенно отчетливых в среднем и позднем голоцене (последние 8,5 т.л.) [8]. Различаются первая и вторая половины голоцена: амплитуды морфодинамических и палеогидрологических изменений, значительно нарастают после 5.5 т.л.н.

5. Показано, что флювиальные геоморфологические ландшафты представляют комбинацию современных и разновозрастных реликтовых элементов, часть которых может наследоваться современными [2, 10]. К таковым относятся ложбинные системы междуречий, избыточные ширины дна балок и речных долин, крупные палеорусла и веера их блуждания на поймах, очертания современных речных русел, унаследованные от больших доголоценовых или малых среднеголоценовых форм.

6. Установлено, что основные события флювиальной морфодинамики имеют широкое пространственное распространение в умеренном поясе Северной Евразии и за ее пределами. Выделены следующие события трансконтинентального охвата: углубление долинно-балочной сети в конце МИС 3; подавление флювиальной активности эоловыми процессами и выполнение долин в период последнего ледникового максимума (LGM); врезание рек и расширение дна долин, формирование больших русел в позднеледниковье (18–13 тыс. л.н.); падение стока и формирование малых русел в среднем голоцене (8.5–3.5 тыс.л.н.); повышенная паводковая активность и аккумуляция на поймах в Малый ледниковый период (XIV–XIX вв).

7. Оценки изменения водного стока в геологическом прошлом использованы для решения ряда проблем палеогеографии умеренного пояса. Так, показано, что раннехвалынская трансгрессия Каспия объясняется ростом климатического стока в бассейне Волги без привлечения внешних источников в виде талых ледниковых вод [3, 5]. Показано отсутствие значительных межбассейновых переливов, связанных с ледниковым подпруживанием в эту эпоху [9]. Для ряда явлений второй половины голоцена, считающихся результатом антропогенного нарушения ландшафтов, предложены палеоклиматические объяснения: проявления линейной эрозии в среднем и позднем голоцене, усиление паводочности рек и погребение пойменных почв в середине прошедшего тысячелетия, исчезновение малых рек в последние два столетия.

1. *Еременко Е.А., Панин А.В.* Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины. М.: МИРОС, 2010. 192 с.

2. *Панин А.В.* Методы палеогеографических исследований: четвертичная геохронология. М.: Географический факультет МГУ, 2014. 116 с.

3. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Украинцев В.Ю.* Вклад талых ледниковых вод в формирование стока Волги в последнюю ледниковую эпоху // Водные ресурсы, 2021, т.48, №6. С.656–663

4. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В.* Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология, 2011, №3. С. 20-31.

5. *Сидорчук А.Ю., Украинцев В.Ю., Панин А.В.* Оценка годового стока Волги в позднеледниковье по данным о размерах палеорусел // Водные ресурсы, 2021, т.48, № 6. С. 643-655.

6. *Panin A., Adamiec G., Buylaert J.-P. et al.* Two Late Pleistocene climate-driven incision/aggradation rhythms in the middle Dnieper River basin, west-central Russian Plain. Quaternary Science Reviews, 2017, 166. P. 266-288

7. *Panin A., Borisova O., Konstantinov E. et al.* The Late Quaternary evolution of the upper reaches of fluvial systems in the southern East European Plain. Quaternary, 2020, 3(4). Paper 31.

8. *Panin A., Matlakhova E.* Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. Catena, 2015, 130. P. 46-61.

9. *Panin, A., Astakhov, V., Komatsu, G. et al.* Middle and Late Quaternary glacial lake-outburst floods, drainage diversions and reorganization of fluvial systems in northwestern Eurasia // Earth-Science Reviews, 2020, 201. Paper 103069.

10. *Panin, A., Borisova, O., Belyaev, V. et al.* Evolution of the Upper Reaches of Fluvial Systems within the Area of the East European Plain Glaciated during MIS 6 // Quaternary, 2022, 5. Paper 13.

# ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Д.А. Субетто*

ФГБУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена», г. *Санкт-Петербург*
Институт водных проблем Севера ФГБУН ФИЦ «КарНЦ РАН», *г. Петрозаводск*
ФГБУН «Институт водных и экологических проблем СО РАН», *г. Барнаул*
subettoda@herzen.spb.ru

Началом отсчета появления палеолимнологии как научного направления в России можно считать 1959 г. (в 2019 г. исполнилось 60 лет), когда была основана первая палеолимнологическая лаборатория в Лимнологическом институте СО АН СССР в г. Иркутске. Инициатором создания был д.г.-м.н. Герберт Генрихович Мартинсон. В 1972 г., его же усилиями была создана лаборатория палеолимнологии в Институте озероведения АН СССР в г. Ленинграде. В 1976 году сформирована Палеолимнологическая комиссия в Географическом обществе СССР (ныне Русское географическое общество) [1].

Палеолимнология – это наука, которая на основе междисциплинарного исследования донных отложений разнотипных озер изучает пространственно-временные особенности и закономерности возникновения и эволюции озер, их экосистем, трансформации окружающих ландшафтов и климата в прошлом под воздействием разнообразных природных и антропогенных факторов. Донные отложения озёр, среди других геологических архивов, являются летописями, в которых записана и сохранена информация об природно-климатических обстановках прошлого с временным разрешением от тысячелетий и столетий до года [2]. В последние годы значительно вырос интерес к палеоэкологическим и к палеолимнологическим исследованиям Северного полушария. Это вызвано, в первую очередь, проблемой глобальных изменений климата, особенно в высоких широтах. В приполярных областях Северного полушария располагается огромное количество озер различного генезиса и морфометрии, заархивировавших в своих донных отложениях подробную информацию об изменениях климата и ландшафтов и гидрологии в плейстоцене и голоцене [3].

В 1980–1990-е годы были проведены палеолимнологические исследования по проекту «История озер СССР», инициированного и возглавляемого Институтом озероведения АН СССР. В рамках этой многолетней темы был изучен ряд озер Кольского полуострова, Большеземельской тундры, п-ова Таймыр и других северных регионов Евразии [4, 5]. В настоящее время палеолимнологические исследования озер северной Евразии проводятся в рамках многочисленных международных проектов (напр. «Озеро Эльгыгытгын», «Озера Сибири», «Палеолимнологический трансект» и др.). Благодаря этим проектам получены новые знания о пространственно-временных особенностях развития озер, ландшафтов и климата в плейстоцене и голоцене, созданы различные палеогеографические базы данных [6, 7]. Однако, не смотря на расширение и увеличение палеолимнологических исследований, изученность российской части Северной Евразии несопоставимо низка по сравнению с Европой и Северной Америкой [8].

В последние годы активно ведутся палеолимнологические исследования в целях палеоокеанологических реконструкций, в первую очередь для изучения динамики относительного уровня морей, в частности внутренних Белого и Балтийского. Благодаря исследованию донных отложений «изоляционных озер», сформировавшихся после

снижения уровня моря, реконструированы уровенные режимы Балтийского и Белого морей после их дегляциации, выявлены их пространственно-временные особенности [9, 10].

В рамках международных проектов и проектов, поддержанных РНФ и РФФИ, проведены масштабные палеолимнологические и геологические исследования Ладожского и Онежского озер. Получены новые данные по геофизике и по бурению донных отложений, которые позволили построить новые стратиграфические схемы, решить ряд вопросов о скорости дегляциации котловин и об особенностях озерно-ледникового и озерного осадконакопления, определить источники осадочного материала на разных этапах развития озер, реконструировать очертания озер и их водосборных бассейнов, рассчитать площади зеркала и объемы Ладоги и Онеги в позднем плейстоцене и голоцене [11, 12, 13].

Исследования донных отложений озер севера Евразии позволят подробнее реконструировать гидроклиматические условия прошлого, динамику береговой линии арктических морей, эволюцию экосистем озёр и проследить направления их дальнейшего развития, спрогнозировать вероятные изменения природной среды и климата в будущем.

*Благодарности*. Исследования выполнены и проводятся в рамках проектов РНФ (18-17-00176-П), РФФИ (18-05-00303, 18-05-80087, 19-05-50014) и госзаданий Минобрнауки (0306-2021-0001) и Минпросвещения России (FSZN-2020-0016).

1. *Сапелко Т.В., Субетто Д.А.* 60 лет палеолимнологии в России // Известия РГО, 2020, том 152 (1), с. 1-5.

2. *Субетто Д.А.* Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции / Отв.ред. Академик А.П. Лисицын. СПб: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 343 с.

3. *Субетто Д.А., Назарова Л.Б., Пестрякова Л.А. и др.* Палеолимнологические исследования в российской части северной Евразии: обзор // Сибирский экологический журнал, 2017, том 24(4), с. 369-380.

4. История озер Восточно-Европейской равнины (Серия: История озер) // Н.Н. Давыдова (отв. ред.), О.Ф. Якушко, Д.Д. Квасов и др.] СПб: Наука, 1992, 262 с.

5. История озер Севера Азии (Серия: История озер) // В.Ф. Шувалов, В.И. Хомутова, М.А. Андреева и др.]; Редкол.: Н.Н. Давыдова (отв. ред.) и др.; СПб.: Наука, 1995. 288 с.

6. *Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A. et al.* Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in northeastern Siberia: Implications for seasonal climate variability // Quaternary Science Reviews, 2016, Vol. 147 (1), pp. 406-421.

7. *Syrykh L., Subetto D., Nazarova L.* Paleolimnological studies on the East European Plain and nearby regions: the PaleoLake Database // J Paleolimnol, 2021. 65, pp. 369–375.

8. *Sundqvist H.S., Kaufman D.S., McKay N.P.,… Subetto D.A. et al.* Arctic Holocene proxy climate database – new approaches to assessing geochronological accuracy and encoding climate variables // Climate of the Past, 2014, 10, pp.. 1605-1631.

9. *Rosentau A., Klemann V., Bennike O., Steffen H., Wehr J., Latinovic M.,…, Subetto D.A* Holocene relative sea-level database for the Baltic Sea // Quaternary Science Reviews, 2021. Vol. 266, 107071. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107071

10. *Ludikova A.V., Subetto D.A., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V.* From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions // Quaternary International, 2021. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.07.007

11. *Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Savelieva L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., Melles M.* Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // Boreas, 2019, 48(2), pp.330-348.

12. *Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A.* Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations // J. of Paleolimnology, 2019, Vol. 62(1), pp 53–71.

13. *Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V., Belkina N. et al.* Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) // Minerals 2020, 10(964). https://doi.org/10.3390/min10110964

# «ОКЕАНОЛОГИЯ»

## ВОСТОЧНО-АРКТИЧЕСКИЙ ШЕЛЬФ – ПРИРОДНЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО ЛИТОМОРФОГЕНЕЗА ПЕРЕГЛЯЦИАЛЬНО-МОРСКОЙ ГЕОСФЕРЫ

*О.В. Дударев*
ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН, *г. Владивосток*
dudarev@poi.dvo.ru

Осушенный восточно-арктический шельф во время последней регрессии уровня моря позднего плейстоцена испытал масштабное криогенное воздействие, предопределившее развитие толщ многолетнемерзлых пород. Гляциоэвстатические колебания уровня моря на фоне глобальных изменений природных условий, должны были отразиться на состоянии многолетней мерзлоты, гидрологическом и гидробиологическом режиме водной толщи, на перестройке среды осадко- и рельефообразования. Поэтому, испытавший экстремально низкие температурные условия в последний климатический минимум, восточно-арктический шельф рассматривается с нескольких позиций. Это мезомасштабный полигон для выявления характерных особенностей современного литоморфогенеза перегляциально-морской геосферы, источник важной научной и прикладной информации как основы для палеогеографической ретроспективы и прогнозной оценки будущих изменений окружающей среды.

Изучением позднечетвертичного развития арктического шельфа занимались крупнейшие национальные научные и научно-производственные организации: ААНИИ, ВНИИОкеангеология (НИИГА), ПИНРО, ВНИРО, НПО «Севморгео», ПГО «Севморгеология», ГУНИО СССР, ИО РАН, ТОИ ДВО РАН, ИМ СО РАН, ПГО «Якутскгеология» и другие. Результаты исследований отражены в монографиях академика Г.Г. Матишова, академика А.П. Лисицына, А.С. Ионина, В.С. Медведева, Ю.А. Павлидиса, С.Л. Никифорова, Н.М. Дунаева, И.Д. Данилова, Д.С. Яшина и В.А. Кошелевой, Ю.П. Семенова и ряда ученых. Новые знания, наряду с полученными другими авторами, позволят понять и объяснить многие, нередко феноменальные природные процессы.

Данная работа базируется на результатах 35 междисциплинарных национальных и международных экспедиций (1964 станции), организованных ТОИ ДВО РАН в период 1999–2020 гг.

Для восточно-арктического шельфа построена новая карта донных осадков, демонстрирующая согласованность пространственной литологической структуры (при господстве алевритово-пелитовых и пелитовых илов) с прерывистыми темпами позднечетвертичной трансгрессии моря, морфоструктурой дна, ледовым режимом акватории и характером циркуляции вод. На среднем шельфе среди обширного поля илов закартированы интразональные ареалы осадков смешанного размерного состава с содержанием песчаной фракции до 60%. В качестве причин обнаруженной азональности выдвигаются приуроченность полей песчаных осадков к палеоступени фазы замедления трансгрессии моря ~12 тыс. л.н. в пределах затопленных речных долин, а также проявления флюидного литогенеза.

Впервые построена карта, демонстрирующая характер результирующего среднемноголетнего (1999–2020) распределения органического углерода ($C_{орг}$) в донных осадках и взвеси. Содержание Сорг в донных осадках составляло 0.1–3.8% с наиболее широким диапазоном изменчивости на западной и восточной периферия восточно-арктического шельфа и в областях влияния речного стока. Центральная часть шельфа – область низкого содержания, отражающего лабильность реликтового $C_{орг}$ берегового ледового комплекса.

Выявлен мезомасшабный «восточный» тренд утяжеления $\delta^{13}C$. Выполнена оценка источников Сорг. Как и для изотопного состава Сорг, также прослеживается мезомасшабный «восточный» тренд замещения терригенного углерода морским планктогенным. К внешнему шельфу содержание терригенного $C_{орг}$ вследствие биодеградации в процессе водной миграции сокращается примерно на 85%.

Результаты наших многолетних исследований включены в Первую международную база данных стран Арктической зоны (Швеция, Россия, США, Великобритания, Канада, Норвегия и др.) «CASCADE - The Circum-Arctic Sediment Carbon Database», которая визуализирует пространственную структуру показателей элементно-изотопного и молекулярного состава органического вещества всех арктических морей.

Решались вопросы оценки современного состояния некоторых форм реликтового субаэрального рельефа (затопленные морем останцы позднеплейстоценовой едомной равнины, полигонально-валиковый микрорельеф) и выявления причин его устойчивости к деформациям.

В заключение отметим, что на сегодняшний день объем накопленных знаний заложил фундамент для дальнейшего прогресса в познании современной природы восточно-арктического шельфа и его эволюционной истории. Расширить наши представления в этой области могут исследования по некоторым проблемным вопросам, как например:

– взаимодействие потоков вещества в пограничной зоне «бровка шельфа – материковый склон»,

– гравитационные склоновые взвесенесущие потоки,

– тонкая ламинация нефелоидных потоков в области придонной неопределенности,

– трансформация терригенного стока при прохождении градиентных барьерных зон.

Можно не сомневаться о достойном вкладе результатов предстоящих исследований в общую копилку научных знаний о восточно-арктической перегляциально-морской геосфере.

# ЛАГРАНЖЕВА ОКЕАНОГРАФИЯ

*С.В. Пранц*

ФГБУ «Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН», *г. Владивосток*
prants@poi.dvo.ru

В докладе представлен краткий обзор недавних результатов автора с сотрудниками по развитию нового направления в океанологии – «лагранжевой океанографии» [1]. В основе лагранжева подхода лежит вычисление траекторий большого числа виртуальных частиц (имитирующих парселы воды) в альтиметрическом поле скорости или в полях скорости численных моделей циркуляции и реанализов. Разработана и внедрена новая методология изучения динамических процессов в океане, основанная на расчете лагранжевых индикаторов и лагранжевых карт с использованием идей и методов теории нелинейных динамических систем. Интегрируя уравнения адвекции вперед и назад во времени, вместе с траекториями частиц вычисляются различные функции траекторий – лагранжевы индикаторы, в числе которых длина пройденного пути, показатель Ляпунова (критерий хаотического перемешивания), смещения частиц и места их происхождения, числа вращения и многие др. Значения индикатора наносится на географическую карту и кодируются цветом. Лагранжевы карты оказались эффективным средством для изучения вихрей, поскольку позволяют не только детектировать их в любую погоду, но и вычислять кинематические свойства, состав вод в ядрах и др. характеристики в любом месте океана как ретроспективно, так и в реальном времени.

С помощью ежесуточно рассчитанных лагранжевых карт и автоматического алгоритма детектирования вихрей впервые проведена полная перепись всех мезомасштабных вихрей глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: Алеутских, Камчатских, Курильских, Хоккайдских и Японских вихрей. Задокументирована «биография» каждого такого вихря в альтиметрическую эру (с 1993 г. по наст. время), включая его зарождение, слияние с др. вихрями, расщепление и распад. Проведена классификация вихрей глубоководных желобов по механизмам их зарождения, причинам стагнации и дрейфа и гидрологическим свойствам [2]. Внедрена в практику методика сопровождения морских экспедиций. Рассчитанные в лаборатории на берегу лагранжевы индикаторы, положения вихрей, их центры (с точностью до нескольких км), контуры ядер, стримеры и проч. ежедневно высылаются по электронной почте на борт судна в виде лагранжевых карт, способствуя оптимизации маршрута экспедиции с экономией топлива и уточнению координат судовых разрезов и съемок.

Введена новая концепция лагранжевых фронтов (ЛФ) и разработан численный метод их детектирования в режиме реального времени по максимумам градиентов лагранжевых индикаторов. Автором с сотрудниками и др. авторами было показано, что вблизи ЛФ концентрируются питательные вещества, фито- и зоопланктон, создавая пищевые «оазисы» в открытом океане для морских обитателей: пелагических рыб, черепах, птиц, морских львов, пингвинов, китов [3]. ЛФ играют важную роль в морской экологии и промысле. Устойчивые ЛФ являются перспективными ареалами для создания морских охраняемых территорий. Создан архив лагранжевых карт в Охотском море и в промысловых районах северо-западной части Тихого океана и базы данных с уловами различных видов рыб (сайра, палтус, минтай) и кальмара за большой период времени. Сравнивая функции распределения мест улова со случайными местами, с помощью различных статистических тестов для обширных выборок показана корреляция положения устойчивых ЛФ с местами промысла [3, 4]. Показано, что лагранжевы карты

с идентифицированными ЛФ можно использовать для оперативного прогноза мест, благоприятных для промысла различных видов. Даны рекомендации ихтиологам и рыбакам по трендам изменения океанографической обстановки в последние годы и смещению ряда угодий из традиционных прибрежных районов в открытый океан.

В свое время было проведено первое численное моделирование распространения радионуклидов после аварии на «АЭС Фукусима-Дайичи» в марте 2011 г. и показана роль вихрей в их перемешивании и переносе [5]. Моделирование показало, что некоторые из долгоживущих мезомасштабных вихрей содержали в своих ядрах загрязненную воду до одного года и более после аварии. Результаты моделирования подтверждены данными измерения концентрации цезия 134 и 137 в рингах Куросио и в вихрях вблизи берегов Японии и Курил в различных японских экспедициях в 2011 и 2012 гг. и в экспедиции на НИС «Профессор Гагаринский» в 2012 г. [6].

Впервые было проведено почасовое ретроспективное моделирование распространения радиоактивного загрязнения в заливе Петра Великого (Владивосток) после аварии на АПЛ в б. Чажма 10 авг. 1985 г. Расчеты с численной модели ROMS с разрешением 600 м показали, что на адвекцию радионуклидов существенное влияние оказали тайфуны и суб- и мезомасштабные вихри, которые стали коллекторами радиоактивной воды с последующим выносом ее в открытую часть залива. Неустойчивые многообразия, «притягивающие» примесь, эволюционируют значительно медленнее поля скорости, что делает возможным прогноз распространения различных видов загрязнения на срок в несколько суток, способствуя ликвидационным работам.

Работа поддержана грантом РНФ № 19-17-00006.

1. *Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V.* Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean. Berlin: Springer Verlag, 2017. 271 p.

2. *Пранц С.В.* Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2021. Т. 57. С. 387–400.

3. *Prants S.V.* Marine life at Lagrangian fronts // Prog. in Ocean., 2022 (в печати).

4. *Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. et. al.* Lagrangian fronts and saury catch locations in the Northwestern Pacific in 2004–2019 // J. Marine Systems, 2021. V. 222. 103605.

5. *Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В.* Численное моделирование распространения в океане радиоактивного загрязнения от АЭС «Фукусима-Дайичи» // Доклады РАН, 2011. Т. 439. № 6. С. 811–814.

6. *Будянский М.В., Goryachev V.A., Kaplunenko D.D. et. al.* Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean // Deep Sea Research I, 2015. V.96. P. 15–27.

7. *Budyansky M.V., Fayman P.A., Uleysky M.Yu., Prants S.V.* The impact of circulation features on the dispersion of radionuclides in the Chazhma Bay: a Lagrangian simulation // Marine Pollution Bulletin, 2022. V. 177. 113483.

# РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИБРЕЖНЫХ РИСКОВ, СВЯЗАННЫХ С МОРСКИМИ ПРИРОДНЫМИ КАТАСТРОФАМИ

*А.И. Зайцев*

ФГБУН «Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН», *г. Южно-Сахалинск*
aizaytsev@mail.ru

В настоящее время возрастает роль Мирового океана в экономике всех стран, что приводит к активному освоению прибрежных территорий и увеличению численности населения в прибрежных регионах. В связи с этим возрастает и риск морских природных катастроф. Как известно, риск определяется как физическими характеристиками катастроф, так и социальными характеристиками населенных пунктов. Не последнюю роль здесь играет и изменение климата, проходящее хоть и медленно, но постепенно меняющее условия жизни населения. Отсюда возникает необходимость разработки соответствующих планов, направленных на смягчение последствий природных катастроф и уменьшение риска для населения. Такие планы базируются на результатах научных исследований в данной междисциплинарной области знаний. Для этого необходимо иметь физические и математические модели, позволяющие рассчитать возможные параметры катастроф, а также проводить непрерывный мониторинг окружающей среды. Так же нужно внедрять системы оценки и прогноза природных процессов (волновые и ветровые характеристики, зона затопления и т.д.) через распознавание изображений с прибрежных камер и другой доступной информации на основе аппарата искусственных нейронных сетей. Что было внедрено в представленную разработку и приносит множество новых возможностей.

Главным результатом данной работы являются разработанные элементы и прототипы информационной системы прибрежных рисков, связанных с природными катастрофами. Для этого был выполнен анализ прошедших природных катастроф, а также оценены возможные события в будущем. Были рассчитаны вызванные этими событиями зоны затопления и гидродинамическое воздействие на берегу.

# ЛУЧЕВОЙ И ВОЛНОВОЙ ХАОС В АКУСТИКЕ ОКЕАНА

*Д.В. Макаров*

ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева» ДВО РАН, *г. Владивосток*
makarov@poi.dvo.ru

Теория лучевого и волнового хаоса не только позволила существенно расширить аппарат теории распространения волн в неоднородных средах, но и заставила пересмотреть некоторые ранее сложившиеся представления. Суть лучевого хаоса заключается в том, что траектория луча, распространяющегося в слабонеоднородной среде, является неустойчивой к сколь малым изменениям начальных условий. Как следствие, такая траектория приобретает крайне нерегулярный вид и является предсказуемой только на очень ограниченном начальном ее участке. Данное явление оказалось очень значимым в акустике океана в контексте дальнего (на расстояния порядка сотен километров) и сверхдальнего (расстояния порядка тысяч или десятков тысяч километров) распространения звука в подводных звуковых каналах. Было обнаружено, что даже малая неоднородность поля скорости звука, обусловленная океаническими внутренними волнами, оказывается достаточной для того, чтобы привести к неустойчивости звуковых лучей. Явление лучевого хаоса накладывает фундаментальные ограничения на схемы гидроакустической томографии океана, основанные на анализе времен прихода лучей. По этой причине лучевой и волновой хаос стали на некоторое время одной из самых актуальных проблем в акустике океана.

Значительный вклад в теорию хаоса в акустике океана внесли ученые из России, в том числе представляющие ТОИ ДВО РАН. Часть полученных результатов легла в основу монографии [1] и обзора [2]. Был выявлен один из основных механизмов возникновения лучевого хаоса — резонансное рассеяние звуковых лучей на вертикальных осцилляциях поля внутренних волн, это явление получило название вертикального лучевого резонанса [3]. Это позволило, с одной стороны, дать объяснение наблюдаемой в большинстве экспериментов сильной хаотичности пологих лучей, распространяющихся под малыми углами относительно горизонтальной плоскости. С другой стороны, удалось установить, что с понижением частоты сигнала влияние вертикального лучевого резонанса ослабевает, и рефракция звуковых волн становится регулярной [1, 4, 5].

Характерной особенностью лучевого хаоса является сосуществование лучей, демонстрирующих хаотическое поведение, с устойчивыми нехаотическими лучами. Последние формируют когерентные пучки — когерентные кластеры, которые могут распространяться не распадаясь на довольно большие расстояния [6]. Была разработана теория образования когерентных лучевых кластеров [7], а также исследованы проявления соответствующих им волновых пакетов в интерференционной структуре акустического поля [8]. Одним из главных результатов работы [8] является обнаружение когерентных волновых пучков с аномально высокой устойчивостью по отношению к рассеянию на случайных неоднородностях. Это позволило объяснить результаты серии экспериментов по дальнему распространению звука, проведенных в Японском море [9, 10].

В работах [2, 8] начато новое направление в теоретической акустике океана, связанное с использованием теории случайных матриц для моделирования дальнего распространения звука. Параллельно это направление развивалось в США [11, 12]. Было показано, что теория случайных матриц также способна предсказывать образование когерентных волновых пучков [13]. Наиболее значительный прогресс был достигнут

в работе [14], в которой удалось обобщить теорию случайных матриц на широкий класс подводных звуковых каналов с крупномасштабными гидрологическими неоднородностями. Получены новые результаты в теории акустических антенн, которые позволяют как регистрировать [15], так и излучать когерентные волновые пучки в экспериментах [16].


1. *Makarov D., Prants S., Virovlyansky A., Zaslavsky G.* Ray and wave chaos in ocean acoustics: Chaos in waveguides. Singapore.: World Scientific, 2010. 388 p.

2. *Вировлянский А.Л., Макаров Д.В., Пранц С.В.* Лучевой и волновой хаос в подводных акустических волноводах // Успехи физических наук, 2012. Т. 182, № 1, С. 19–48.

3. *Макаров Д.В., Улейский М.Ю.* Высвечивание лучей из горизонтально-неоднородного подводного звукового канала // Акустический журнал, 2007. Т. 53, № 4, С. 565-573.

4. *Kon'kov L.E., Makarov D.V., Sosedko E.V., Uleysky M.Yu.* Recovery of ordered periodic orbits with increasing wavelength for sound propagation in a range-dependent waveguide // Physical Review E, 2007. V. 76, 056212.

5. *Макаров Д.В., Коньков Л.Е., Улейский М.Ю.* Соответствие между лучевой и волновой картинами и подавление хаоса при дальнем распространении звука в океане // Акустический журнал, 2008. Т. 54, № 3, С. 439-450.

6. *Makarov D.V., Uleysky M.Yu., Prants S.V.* Ray chaos and ray clustering in an ocean waveguide // Chaos, 2004. V. 14, № 1, P. 79-95.

7. *Makarov D.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V., Prants S.V.* Clustering in randomly driven Hamiltonian systems // Physical Review E, 2006. V. 73, 066210.

8. *Makarov D.V., Kon'kov L.E., Uleysky M.Yu., Petrov P.S.* Wave chaos in a randomly inhomogeneous waveguide: Spectral analysis of the finite-range evolution operator // Physical Review E, 2013. V. 87, 012911.

9. *Spindel R.C., Na J., Dahl P.H., Oh S., Eggen C., Kim Y.-G., Akulichev V.A., Morgunov Yu.N.* Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan // IEEE J. Ocean. Engin., 2003. V. 28, № 2, P. 297-302.

10. *Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А.* Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акустический журнал, 2009. Т. 55, № 3, С. 374–380.

11. *Hegewisch K.C., Tomsovic S.* Random matrix theory for underwater sound propagation // Europhysics Letters, 2012. V. 97, 34002.

12. *Hegewisch K.C., Tomsovic S.* Constructing acoustic timefronts using random matrix theory // J. Acoust. Soc. Am., 2013. V. 134(4), Pt. 2. P. 3174–3184.

13. *Makarov D.* Random matrix theory for low-frequency sound propagation in the ocean: a spectral statistics test // J. Theor. Comput. Acoust., 2018. V. 26(1), 1850002.

14. *Makarov D.* Random matrix theory for an adiabatically-varying oceanic acoustic waveguide // Wave Motion, 2019. V. 90, P. 205-217.

15. *Макаров Д.В.* Об измерении углов прихода акустических импульсов с помощью вертикальной антенны // Акустический журнал, 2017. Т. 63, № 6, С. 637–645.

16. *Макаров Д.В.* Применение метода дискретного представления переменных для формирования амплитудно-фазовых распределений поля на вертикальной антенной решетке в волноводе // Акустический журнал, 2021. Т. 67, № 4, С. 413–-430.

# ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ МИРОВОГО ОКЕАНА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

*Р.Б. Шакиров*

ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН», *г. Владивосток*
ren@poi.dvo.ru

Актуальность исследования газогеохимических полей углеводородных газов, гелия, водорода, углекислого газа, азота, кислорода, их соотношений и изотопных характеристик, радона, атомарной ртути и других высокоподвижных, в том числе климатически активных веществ, связана с их важной ролью в явлениях и процессах в океанологии, геологии, геофизике, экологии и биологии. Вопросы, связанные с потоками природных газов и их источниками в Мировом океане и его континентальном обрамлении: низкотемпературными сипами, гидротермами, потоками газов из угленосных толщ, грязевыми вулканами, газогидратами, рудоносными геоструктурами находят отражение в сотнях научных трудов. Область влияния субмаринных газо- и флюидопроявлений охватывает верхнюю часть литосферы, гидросферу и нижнюю часть атмосферы Мирового океана и включает экосистемный аспект. Участки подводной дегазации занимают значительные площади дна, но недостаточно исследованы, а количество их находок увеличиваются и области распространения расширяются год от года с развитием экспедиционных исследований.

Исследования с участием автора проведены на акваториях Тихого, Северного Ледовитого, Индийского, Южного и Атлантического океанов в период 1997–2022 гг. Особое внимание уделено газогеохимическим полям углеводородной специализации. Рассмотрено, что газы и флюиды оказывают значительное влияние как на глубоководные экосистемы (включая хемосинтез), так и в целом продуктивность толщи вод (привнесение элементов). Потепление вызывает диссоциацию газогидратов вдоль континентальных окраин, взаимосвязь климатических изменений и газовофлюидной эмиссии из океанического дна существует, но исследована незначительно. Газогеохимические поля является высокоинформативными индикаторами геологических процессов и минеральных ресурсов, они эффективно применяются для геокартирования.

В исследовании используются новые апробированные положения: газогеохимическая провинция; многоярусное строение газогидратных залежей; газогидратоносная провинция; газогидратоносный пояс; Тихоокеанское газогидратоносное кольцо; газогеохимический режим.

В ходе исследований установлено:

1. На примере Охотоморского региона выделены пять газогеохимических провинций, обусловленных особенностями геологического строения и процессами миграции и трансформации газовых компонентов.

2. Химический и изотопный состав аномальных газогеохимических полей и газопроявлений в условиях зоны перехода «континент – океан» определяется, главным образом, их геоструктурным положением;

3. Высока роль миграционных газов в формировании аномальных газогеохимических полей;

4. Показано, что формирование газогидратов вызвано концентрированными формами эмиссии микробных, термогенных и метаморфогенных газов, установлено важное значение "масс-балансного эффекта" в формировании результирующего состава гидратообразущих газов;

5. Установлена зависимость основных характеристик газогеохимических полей от сейсмотектонической обстановки. На примере морей Восточной Азии выделено 4 типа связи газогеохимических полей и газопроявлений с сейсмической активностью районов. Установленные закономерности связи характеристик газовых потоков с флуктуациями сейсмотектонических процессов важны для оценки фундаментальных вопросов рассеяния вещества и безопасности населенных прибрежных территорий. В этом аспекте особую важность имеют превентивные измерения (мониторинг).

6. Определен комплекс наиболее эффективных качественных и количественных газогеохимических критериев оценки генезиса и распределения газогеохимических полей, в том числе для целей поиска залежей углеводородов и прогноза сейсмической активности.

7. Закономерности геологического контроля газогидратоносности и распределения аномальных газогеохимических полей раскрывают взаимосвязь углеводородных скоплений различного генезиса.

Обсуждается пространственная и генетическая взаимосвязь приповерхностных газогеохимических полей, газопроявлений и газогидратов с подстилающими газоносными, углегазоносными и нефтегазоносными толщами, а также с газами магматических пород. Восходящая эмиссия природных газов обусловливает формирование аномальных полигенетических газогеохимических полей низкой, средней и высокой интенсивности. На акваториях геологически активных континентальных окраин и глубинных зонах дефлюидизации в открытых районах океанов на эти процессы оказывают значительное влияние литосферные нижнекоровые и верхнемантийные источники, а также сейсмотектоническая активность.

Газогидратоносные провинции окраинных морей западной части Тихого океана, отличительной особенностью которых является многоярусность, могут быть объединены в Западно-Тихоокеанский газогидратоносный пояс: прерывистую полосу скоплений газогидратов в кайнозойских отложениях с мощностью до 300 метров в диапазоне глубин 350–2000 метров и начальными ресурсами метана до $2–3\times10^{15}$ куб. м. Установлена связь газогидратоносных районов с нефтегазоносными и угленосными бассейнами. В поисковых газогидратных исследований следует уделить внимание геологическим структурам в пределах современных и палеодельт крупных речных систем. В зонах аномальных газогеохимических полей миграционных газов в осадках могут концентрироваться металлы и минералообразующие элементы (Ag, Cu, Mn, Hg, Ba, As, Fe, V и другие).

Требуется усиление экспедиционной деятельности и развитие наблюдений на морских экспериментальных станциях, определенные перспективы связаны с дистанционным зондированием, междисциплинарными исследованиями, изучением критических условий газогеохимических полей, флюидов и газогидратов.

Результаты газогеохимических исследований вошли в отчеты совместных экспедиционных работ ФГУП «Севморгео» – ТОИ ДВО РАН по государственной программе «Внешняя Граница Континентального Шельфа ВГКШ (Охотское и Восточно-Сибирское моря, 2006–2009 гг., объекты 2-ДВ-М, 1-ОМ, 5-АР)».

Представляемая работа соответствует приоритетам федеральной программы в области экологического развития и климатических изменений до 2030 года.

Газогеохимические исследования являются важным направлением в проекте «ГЕОМИР» (РФ) Десятилетия ООН науки об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.).

# БАЗЫ ДАННЫХ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ АТЛАСЫ, СПУТНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ИЗУЧЕНИИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ В МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

*С.В. Бердников*

ФГБУН «Южный научный центр РАН», *г. Ростов-на-Дону*
berdnikovsv@yandex.ru

Обсуждается единый методический подход к оценке многолетних изменений в морских экосистемах, основанный на разработке баз данных первичных океанографических наблюдений, формировании климатических атласов для выявления климатических норм и аномалий, применении спутниковых технологий для мониторинга состояния морских экосистем и компартментальных математических моделей для оценки изменений в морских экосистемах и сценарного прогнозирования состояния ключевых параметров морских экосистем при изменении климата и антропогенного воздействия.

Рассматривается приложение данного подхода к анализу многолетних изменений в экосистемах Азовского и Баренцева морей.

# ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ – ГЛОБАЛЬНЫЙ ВЗГЛЯД И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

*А.В. Гебрук*

ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», *г. Москва*
agebruk@gmail.com

В районах гидротермальных выходов на дне Мирового океана на глубинах, достигающих 6000 м, формируются уникальные для биосферы планеты экосистемы, в которых первичное органическое вещество синтезируется путем хемосинтеза за счет энергии восстановленных химических соединений, а не путем фотосинтеза, свойственного подавляющему большинству экосистем Земли. Районы гидротерм характеризуется сочетанием чрезвычайно неблагоприятных для жизни условий среды – высокой температурой, достигающей 400 °C и более градусов, насыщенностью сульфидами и тяжелыми металлами, повышенной кислотностью и пр. Несмотря на это в гидротермальных сообществах формируется высочайшая биомасса и плотность поселений удивительных по своей морфологии, способам питания и иным адаптациям животных, которые не встречаются в Мировом океане в «обычных» глубоководных условиях [1, 2]. Эти особенности породили долго господствовавшие представления о независимости гидротермальных экосистем от фоновой жизни в океане, собственной биогеографической истории гидротермальной фауны и чертах ее глобального распределения, диктуемых геометрией срединно-океанических хребтов.

В традициях отечественной школы биоокеанологии был разработан особый подход к анализу глобальной пространственной структуры гидротермальной фауны в океане, в котором основное внимание уделялось выявлению наиболее крупномасштабных черт в распределении облигатных для гидротермальной фауны таксонов и сравнению особенностей биогеографии гидротермальной и фоновой фаун. При всей уникальности отдельно взятой глубоководной гидротермальной экосистемы, анализ глобальных закономерностей выявил неизбирательность влияния важнейших факторов окружающей среды на распределение жизни в океане независимо от её природы - гидротермальной или обычной «фоновой». В итоге, впервые установлены универсальные фундаментальные закономерности распределения гидротермальной и негидротермальной фаун в глобальном масштабе [3].

Также в глобальном масштабе проанализированы особенности вертикального распределения гидротермальных экосистем. Впервые установлены океанические глубины, на которых происходят кардинальные изменения в составе гидротермальной фауны и структуре гидротермальных сообществ. Эта важная фаунистическая и экосистемная граница лежит на глубинах около 200 м. Глубже этой границы резко увеличивается облигатность гидротермальной фауны: возрастает ранг облигатных таксонов, их доля в сообществе и доминирование по биомассе. Эта закономерность дала основание для разделения гидротермальных сообществ на две категории – «глубоководные», формирующиеся глубже 200 м и обитающие выше – от «мелководные» [4]. Эта глубина, «критическая» для уникальных гидротермальных сообществ, в общей схеме вертикальной зональности распределения жизни в Мировом океане соответствует важнейшей границе, разделяющей фауны сублиторали и верхней батиали.

Еще одна важная и универсальная в масштабе Мирового океана закономерность выявлена в организации трофической структуры гидротермальных сообществ: в глубоководных гидротермальных сообществах основную долю биомассы формируют

симбиотрофные (питающиеся симбиотическими бактериями) организмы. Этот вывод был обоснован исследованиями трофоэкологии массовой формы гидротермальной фауны – специализированных гидротермальных креветок, механизм питания которых первое время оставался непонятным [5, 6].

Сегодня гидротермальные системы находятся в центре самого пристального мирового внимания не только как уникальный экологический феномен, но как места крупных залежей полиметаллических сульфидных руд на океаническом дне. Разведка и добыча этих ресурсов регулируется международным законодательством, в котором важнейшее внимание уделяется требованиям обеспечения экологической безопасности и безущербности любого антропогенной воздействия для гидротермальных экосистем [7]. Решение этой проблемы чрезвычайно актуально для Российской Федерации, обладающей заявочным участком на разведку глубоководных полиметаллических сульфидных руд на Срединно-Атлантическом хребте. Приводится краткий анализ этой проблемы.

1. *Гебрук А.В., Галкин С.В.* Гидротермальный биотоп и гидротермальная фауна: общие положения. В: А.В. Гебрук (Отв. ред.) Биология гидротермальных систем. М: КМК, 2002. с. 13–24.

2. *Гебрук А.В., Галкин С.В., Москалев Л.И., Крылова Е.М.* Фауна восстановительных биотопов. В: Р.И. Нигматулин, Л.И. Лобковский (Отв. ред.). Мировой океан. Т. 2. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир, 2014. с. 242–263.

3. *Гебрук А.В., Миронов А.Н.* Проблемы изучения гидротермальной фауны в масштабе глобальных зон и периодов. В: Н.П. Лаверов (Отв. ред.). Актуальные проблемы океанологии. М: Наука, 2004. с. 363-382.

4. *Tarasov V.G., Gebruk A.V., Mironov A.N., Moskalev L.I.* Deep-sea and shallow water hydrothermal vent communities: Two different phenomena? // Chemical Geology, 2005. V. 224. P. 5–39.

5. *Gebruk A.V., Pimenov N.V., Savvichev A.S.* Feeding specialization of Bresiliidae shrimps in the TAG site hydrothermal community // Marine Ecology Progress Series, 1993. V. 98. P. 247–253.

6. *Gebruk A.V., Galkin S.V., Vereshchaka A.L., Moskalev L.I., Southward A.J.* Ecology and biogeography of the hydrothermal fauna of the Mid-Atlantic Ridge // Advances in Marine Biology, 1997. V. 32. P. 93–144.

7. *Gollner S., Colaço A., Gebruk A. et al.* Application of scientific criteria for identifying hydrothermal ecosystems in need of protection // Marine Policy, 2021. V. 132. 104641.

# ОТОБРАЖЕНИЕ ОКЕАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИХ МНОГОЧАСТОТНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*С.А. Ермаков*

ФГБУН «ФИЦ Институт прикладной физики РАН», *г. Нижний Новгород*
stas.ermakov@ipfran.ru

Динамические процессы в приповерхностных слоях океана (внутренние волны, неоднородные течения, вихри, речные плюмы, турбулентные корабельные следы пр.) проявляются на его поверхности за счет изменчивости характеристик коротких ветровых волн, что приводит к вариациям характеристик рассеянного на поверхности радиолокационного (РЛ) сигнала. Соответственно, проблема РЛ, в том числе спутниковой диагностики океанических процессов включает в себя, во-первых, анализ гидродинамических механизмов изменчивости ветровых волн и, во-вторых, анализ механизмов рассеяния микроволн на ветровом волнении. Проблема вызывает неизменный интерес в течение последних десятилетий, однако, несмотря на большое количество выполненных исследований и предложенных моделей, последние не могут корректно описать целый ряд данных наблюдений, получаемых в последние годы с использованием новых методов и средств дистанционного зондирования океана.

В работе дан краткий обзор состояния исследований по проблеме РЛ диагностики океана, выполненных в ИПФ РАН в Отделе радиофизических методов в гидрофизике (ОРМГ). Представлены результаты теоретических работ, лабораторных экспериментов в кольцевом бассейне ОРМГ и натурных морских исследований. Описан уникальный комплекс научного оборудования, созданный в ОРМГ и включающий, в том числе, уникальный 3-х диапазонный двухполяризационный микроволновый радиолокатор, позволяющий реализовать новые подходы к решению проблемы РЛ диагностики океана.

Кратко рассмотрены физические механизмы модуляции гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) под действием внутренних волн и неоднородных течений, а именно, кинематический и пленочный механизмы, приведены результаты их лабораторного моделирования, а также исследований в морских условиях, причем пленочный механизм был впервые количественно описан и подтвержден в натурных исследованиях сотрудниками ОДМГ ИПФРАН [1], представлены также результаты анализа спутниковых изображений внутренних волн, различных типов этих изображений, отвечающих кинематическому и пленочному механизмам [2, 3].

В ходе проведенных исследований, однако, был получен целый ряд результатов, которые не описывались ранее исследованными механизмами и развитыми моделями. Были, в частности, обнаружены эффекты аномально сильной модуляции РЛ сигнала в присутствии внутренних волн, изменений доплеровских сдвигов частоты РЛ сигналов в пленочных сликах, разных для различных поверхностно-активных веществ, не согласующиеся с имеющимися моделями величины поляризационного отношения РЛ сигналов на вертикальной и горизонтальной поляризациях, сильного возрастания доплеровских сдвигов и, соответственно, скоростей рассеивающих волн (структур) на морской поверхности и др. [1, 4–6]. Обнаруженные эффекты предположительно обусловлены нелинейностью коротких поверхностных волн и структурными особенностями их профиля [1, 5]. Для проверки данного предположения выполнены многочисленные лабораторные эксперименты в кольцевом бассейне ОРМГ ИПФРАН, включая исследование профилей коротких ГКВ с длинами порядка 1 дм и более, изучены

такие структуры, как паразитная капиллярная рябь на склонах ГКВ, валообразные (bulge-toe) структуры на гребнях ГКВ, а также сильные обрушения ГКВ [1, 7–9]. При этом показано, что характеристики данных нелинейных структур (наклоны и кривизна) характеризуются чрезвычайно резкой зависимостью от амплитуды (крутизны) ГКВ, поэтому даже слабая модуляция “несущих” ГКВ приводит к сильной модуляции нелинейных структур. Такая модуляция была охарактеризована как “каскадная”, которая была промоделирована в экспериментах с внутренними волнами в кольцевом бассейне, при этом сильная модуляция указанных гидродинамических структур приводила и к сильной модуляции интенсивности радиолокационного сигнала. Были получены подтверждения предложенного каскадного механизма в ходе натурных радиолокационных наблюдений внутренних волн. Лабораторные исследования показали, что спектр мелкомасштабных ветровых ГКВ включает как “свободные”, квазилинейные волны, описываемые обычным дисперсионным уравнением, так и “связанные” волны (bound waves), которые формируются на профиле крутых ГКВ дм-диапазона и которые движутся со скоростями, близкими к скоростям этих ГКВ. Это позволило объяснить данные по РЛ доплеровским сдвигам и поляризационному отношению. Натурные наблюдения, выполненные с использованием поляризационного 3-диапазонного радиолокатора показали возможность разделения сигнала на часть, связанную с ветровыми волнами, определяющими брэгговскую компоненту рассеяния и неполяризованную компоненту, обусловленную наличием нелинейных структур на профиле ГКВ. Дальнейшее развитие модели изменчивости ветровых волн и модели радиолокационного рассеяния с учетом наличия свободных и связанных компонент ветровых волн и раздельного описания позволяет существенно продвинуться в решении проблемы радиолокационной диагностики процессов в океане.


1. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород. ИПФ РАН. 2010. 165 с.

2. *Ermakov S.A., da Silva J.C., Robinson I.S.* The role of surface films in SAR signatures of internal waves on the shelf. II. Internal tidal waves. J. Geophys. Res. 1998. V.103. No.C 4. P. 8033–8043.

3. *da Silva J.C., Ermakov S.A., Robinson I.S.* Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf. 3. Mode transitions // J. Geophys. Res, 2000, V.105, P.24089–24101.

4. *S.A. Ermakov, I.A. Sergievskaya, I.A. Kapustin.* Strong Modulation of Short Wind Waves and Ka-Band Radar Return Due to InternalWaves in the Presence of Surface Films. Theory and Experiment. Remote Sens., 2021, vol. 13, P. 2462 DOI: 10.3390/rs13132462

5. *S.A.Ermakov, et.al.* Remote sensing of organic films on the water surface using dual co-polarized ship-based X-/C-/S-band radar and TerraSAR-X. Rem. Sens. 2018. 10(7), P. 1097.

6. *I.A. Sergievskaya, S.A. Ermakov, A.V. Ermoshkin, et.al.* The Role of Micro Breaking of Small-Scale Wind Waves in Radar Backscattering from Sea Surface. Rem.Sens. 2020, 12, P.4159; doi:10.3390/rs12244159

7. *Gade M., Alpers W., Ermakov S.A., et.al*. Wind-wave tank measurements of bound and freely propagating short gravity-capillary waves. J. Geophys. Res**.** 1998. V.103. No.C10. P.21,697–21,709.

8. *S.A. Ermakov, et.al.* Wave Tank Study of Steep Gravity-Capillary Waves and Their Role in Ka-Band Radar Backscatter. IEEE TGARS. 2021. P.1-12 DOI: 10.1109/TGRS.2021.3086627

9. *S.A. Ermakov, et.al.* Suppression of wind ripples and microwave backscattering due to turbulence generated by breaking surface waves. Rem.Sens. 2020, 12, 3618. doi:10.3390/rs12213618

# УСКОРЕННОЕ СОКРАЩЕНИЕ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО ЛЬДА ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗРАСТАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В СИСТЕМЕ «ОКЕАН – ЛЕД – АТМОСФЕРА»

*В.В. Иванов*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова», *г. Москва*
vladimir.ivanov@aari.ru

Продолжающееся с середины 1990-х годов сокращение арктического морского льда воздействует на гидрометеорологические условия и процессы в Северном Ледовитом океане (СЛО) и полярной атмосфере, что может привести к необратимым климатическим сдвигам и повлиять на темпы социально – экономического развития северных территорий России. После достижения абсолютного минимума в сентябре 2012 года, межгодовые колебания границы ледяного покрова на пике сезонного минимума стабилизировались на новом уровне, который на 22±8% ниже средне-климатической нормы 1979–2021 гг. В последние годы все чаще появляются публикации, в которых предсказывается значительно более ранний переход к сезонно–безледному СЛО [2], чем это прогнозировалось в климатических моделях еще несколько лет назад. Причины наблюдаемого в последнее десятилетие ускоренного сокращения морского льда однозначно не установлены. Однако, имеются серьезные основания предполагать, что помимо сохраняющегося внешнего форсинга, обусловленного антропогенными эмиссиями парниковых газов, оно может быть связано с активизацией положительных обратных связей в системе «океан – лед – атмосфера», которые в условиях круглогодичного доминирования многолетнего сплоченного льда либо вообще не проявлялись, либо были малоэффективными. В дополнение к хорошо известным иописанным в литературе обратным связям, актуальным для высоких широт, в докладе рассмотрены два новых механизма: «сезонная память» в характеристиках ледяного покрова и «атлантификация», действием которых можно объяснить наблюдаемую неравномерность в распределении льда в различных секторах СЛО как в различные годы, так и в разные сезоны.

Феномен «сезонной памяти» в параметрах морского льда известен достаточно давно [1]. Однако, в условиях ледового режима, характерного для второй половины 20-го века, взаимосвязь между параметрами ледяного покрова в последовательные сезоны отмечалась лишь для окраинных морей в отдельные годы с аномальной ледовитостью. Переход на качественно иной ледовый режим, характеризующийся преобладанием однолетнего льда, создал предпосылки для формирования устойчивой «сезонной памяти» в параметрах ледяного покрова в восточно-атлантическом секторе СЛО после 2007-го года. Механизмом формирования «сезонной памяти» является накопление избыточного тепла в верхнем перемешанном слое в условиях продолжительного существование открытой воды в летний сезон (рис.). Когда этого тепла оказывается достаточно, чтобы существенно отсрочить начало замерзания, это приводит к уменьшению толщины льда, и сопряженному через динамический атмосферный форсинг, уменьшению концентрации льда в последующий зимний сезон. В случае значительной задержки в начале ледообразования можно ожидать смещения сроков вскрытия весной и полного очищения ото льда летом на более ранние, т.е. реализации положительной обратной связи на сезонном масштабе. В этом контексте, аномально раннее очищение моря Лаптевых (в начале июля) в 2020 году может быть объяснено именно этим.

Термин «атлантификация» (в широком смысле) означает усиление влияния тепла поступающих в СЛО вод атлантического происхождения, так называемых Атлантических вод (АВ), на ледяной покров [3]. Основным проводником «атлантификации» в восточно-атлантическом секторе СЛО выступает зимняя термическая конвекция, обеспечивающая эффективный вертикальный теплообмен между слоем атлантической воды и верхним перемешанным слоем. Причиной возрастания интенсивности зимней конвекции является сокращение площади и толщины морского льда в летний сезон. Уменьшение объема образующейся при таянии льда воды приводит к возрастанию солезапаса верхнего перемешанного слоя, ослаблению вертикальной плотностной стратификации и созданию благоприятных предпосылок для более глубокого конвективного перемешивания в последующий осенне-зимний сезон. Несбалансированный приток тепла к поверхности океана из слоя АВ замедляет нарастание льда и/или способствует его таянию. Охлаждение и распреснение в верхней части атлантического слоя замедляется, что обеспечивает более дальнее проникновение теплой и соленой воды вблизи поверхности океана и дополнительное таяние льда вдоль траектории переноса АВ. Благодаря такой положительной обратной связи существует гипотетическая возможность распространения «атлантификации» на восточную часть бассейна Нансена, что обсуждается в ряде недавно опубликованных статей [4]

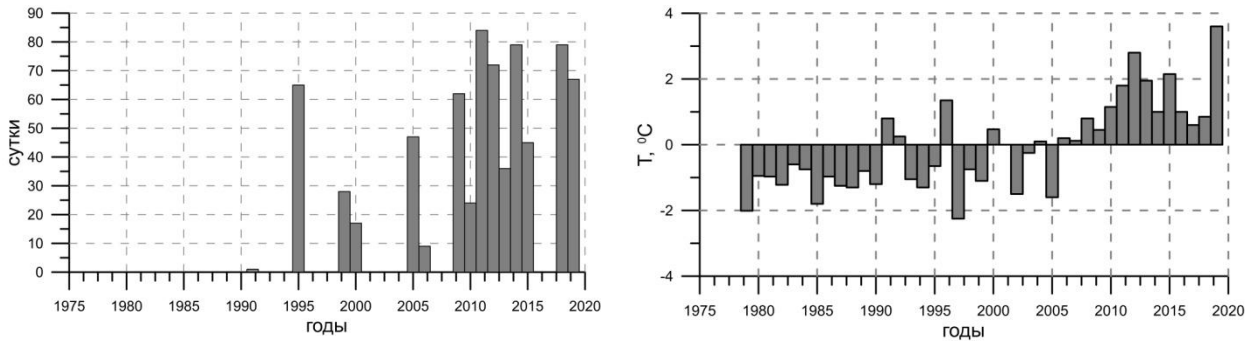
Рассматриваемые в докладе обратные связи способствуют дальнейшему сокращению арктического морского льда, что в свою очередь ведет к их дополнительному усилению. В восточно-атлантическом секторе Арктики оба механизма действуют согласованно, усиливая конечный результат. Более интенсивный летний прогрев верхнего квазиодородного слоя за счет пониженной ледовитости может на каком-то этапе привести к ситуации, когда поступающая в Арктический бассейн АВ сольется с прогретым верхним перемешанным слоем (т.е. сезонный термоклин заметно ослабнет или даже сменит знак?). Следствием этого может стать резкое возрастание глубины зимнего конвективного перемешивания вдоль траектории распространения АВ, в результате чего теоретически возможна ситуация, наблюдавшаяся в климатических условиях 20-го века в Норвежском море и в западной части Баренцева моря: круглогодично безледный режим, поддерживаемый интенсивной теплоотдачей из океана в атмосферу.

1. *Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеоиздат. 1980. 270 с.

2. *Guarino M. et al*. Sea – ice – free Arctic during the Last Interglacial supports fast future loss // Nature Climate Change, 2020.

3. *Ivanov V.V.* Present changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with reduction of the sea ice cover // Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 407—434. [In Russian].

4. *Polyakov I.V., Ivanov, V.V. et al.* Intensification of near□surface currents and shear in the Eastern Arctic Ocean // Geoph. Res. Lett. 46, e2020GL089469.




(а) (б)

Рисунок. (а) – продолжительность безледного сезона (сутки) в море Лаптевых; (б) – аномалия температуры воды (°C) в море Лаптевых по спутниковым данным

# ГЛУБИННАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД И ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ

*Е.Г. Морозов*
ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», *г. Москва*
egmorozov@mail.ru

В холодные периоды года на антарктическом шельфе формируется холодная водная масса за счет выхолаживания воды с поверхности и ледообразования. По мере стекания с шельфа она смешивается с окружающими водами и достигает абиссальных глубин океана, формируя Антарктическую донную воду (ААДВ). Толщина слоя Антарктической донной воды уменьшается от 3–4 км в антарктической области до нескольких сотен метров в северных областях океана. Уменьшение толщины слоя обусловлено перемешиванием с более теплыми вышележащими слоями за счет внутренних волн.

По нашим исследованиям потоки в абиссальных каналах Атлантики характеризуются в целом высокими скоростями (до 50 см/с). Антарктическая донная вода вытекает из моря Уэдделла через проход Оркней в хребте Саут Скотия и проникает в Аргентинскую котловину сквозь многочисленные разломы в хребтах. Затем она перетекает в Бразильскую котловину через каналы Вима и Хантер, а также над плато Сантос. После канала Вима ААДВ медленно течет по Бразильской котловине, а затем делится на два потока: на восток в разломы Романш и Чейн, а также на северо-запад. Часть северо-западного потока ответвляется на восток и перетекает по разлому Вима и по другим разломам в Северо-Восточную Атлантику. Благодаря сильному перемешиванию в разломах Романш и Чейн за счет приливных внутренних волн поток ААДВ значительно теплеет. Затем этот поток достигает прохода Кейн и далее почти не распространяется. Все глубинные котловины северо-восточной Атлантики заполняются донной водой через разлом Вима. Проход Дискавери является конечной точкой распространения ААДВ в смысле ее определения как воды с потенциальной температурой менее 2 °С. Исследования потока ААДВ обобщены в монографиях [1, 2].

Внутренние волны в Мировом океане изучены по результатам моделирования и измерений на 4000 буев. Важнейший результат исследований – это вывод о том, что основным источником генерации внутренних приливных волн является взаимодействие баротропного прилива с подводными хребтами. Ранее считалось, что генерация происходит на континентальных склонах. Впервые построена карта амплитуд приливных внутренних волн для всего Мирового океана. Показано, что на генерацию внутренних приливных волн около подводных хребтов уходит более четверти всей энергии, которую теряет баротропный прилив. Ранее считалось, что баротропный прилив, в основном, диссипирует на мелководье. Исследования приливных внутренних волн обобщены в монографии [3].

Показано, что в экваториальном районе Атлантики внутренние волны очень сильны и перемешивают поток ААДВ. В разломе Вима амплитуда внутренних волн меньшей, и они меньше перемешивают донную воду с вышележащими слоями. За счет этого именно через разлом Вима донная вода заполняет Северо-Восточную Атлантику.

Наши измерения позволили уточнить глобальную схему донных течений и перемешивания в Атлантике и получить дополнительные оценки влияния антарктических вод на климат планеты, что важно для совершенствования моделей изменения климата.

1. *Morozov E., Demidov A., Tarakanov R., Zenk W.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows. Dordrecht: Springer, 2010. 266 p.

2. Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Frey D.I., 2021. Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic. Observations, Analysis, and Modeling, Springer Nature. 2021. 483 p.

3. *Morozov E.G.* Oceanic Internal Tides. Observations, Analysis and Modeling. A Global View // Dordrecht: Springer, 2018. 316 p.

# ВОЛНЫ ЦУНАМИ КАК ПРОБЛЕМА ФИЗИКИ ОКЕАНА

*М.А. Носов*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*
m.a.nosov@mail.ru

В современной научной литературе термином «цунами» принято обозначать поверхностные длиннопериодные ($10^2$–$10^4$ с) гравитационные волны, вызываемые землетрясениями, оползнями и обвалами, вулканическими извержениями, а также метеорологическим причинами (метеоцунами) [1]. Интерес к изучению цунами в РФ (СССР) возник после Камчатского цунами 05.11.1952, которое фактически уничтожило г. Северо-Курильск [2] и привело к гибели ~10 тысяч человек [3].

Наблюдающийся с конца 20-го века стремительный рост населения прибрежной зоны, развитие береговой инфраструктуры и интенсификация хозяйственной деятельности повышают уязвимость берегов к воздействию цунами. Только в начале 21-го века произошли более 10 цунами с высотами заплеска свыше 10 м, унесшие 250 тысяч человеческих жизней и причинившие колоссальный материальный ущерб. Наиболее катастрофические из этих событий – цунами в Индонезии 26.12.2004, 28.09.2018, 22.12.2018, в Японии 11.03.2011, в Чили 27.02.2010, 16.09.2015 – убедительно показали, что, проблема цунами все еще далека от разрешения, а изучение природы этого грозного природного явления и совершенствование методов прогноза остаются актуальными научными задачами.

Научные интересы автора были изначально сосредоточены на теоретических исследованиях механизма генерации волн в океане сейсмическими движениями дна с учетом сжимаемости воды и нелинейности [1, 4–8]. В частности, было теоретически показано, что поверхностные гравитационные и гидроакустические волны, возбуждаемые сейсмическими движениями дна, существуют в непересекающихся частотных диапазонах, разделенных диапазоном «вынужденные колебания». Теоретически было предсказано, а позднее выявлено в природе [9], существование низкочастотных упругих колебаний водного слоя в очаге цунами. Установлено, что при генерации цунами землетрясением преобладает «линейный» механизм – вытеснение воды косейсмическими смещениями дна, а вклад нелинейных эффектов – переход энергии по спектру от упругих или вынужденных колебаний водного слоя к гравитационным волнам – находится, как правило, на уровне нескольких процентов амплитуды [7, 8]. Разработан практический метод расчета начального возвышения в очаге цунами [10].

С использованием данных о структуре подвижки в очагах сильных подводных землетрясений установлено, что наряду с вертикальными косейсмическими смещениями дна, значительный вклад в вытесненный объем, а, следовательно, и в волну цунами, обеспечивают горизонтальные смещения подводных склонов, причем этот вклад почти всегда является дополнительным [11].

По данным глубоководных обсерваторий DONET подтверждено существование частотного диапазона «вынужденные колебания», в котором вариации давления и вертикальная компонента ускорения дна связаны 2-м законом Ньютона [12]. На основе этой связи предложен метод проверки калибровки датчиков глубоководных обсерваторий [13]. С использованием данных DONET обнаружен и исследован эффект генерации

свободных гравитационных волн в океане длиннопериодными сейсмическими поверхностными волнами [14].

На основе оригинального аналитического решения проанализированы остаточные гидродинамические поля, возникающие во вращающемся однородном и стратифицированном океане при косейсмических смещениях дна [15]. Установлено, что волны, возбуждаемые в океане сильными глубокофокусными землетрясениями, в значительной степени могут быть подвержены влиянию эффекта вращения Земли в силу возможной близости радиуса Россби и размера очага цунами.

На основе оригинальных теоретических разработок и численных моделей создана автоматическая система оценки цунамиопасности землетрясения «Tsunami Observer» [16], результаты работы которой находятся в открытом доступе http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/.


1. *Levin B.W., Nosov M.A.* Physics of Tsunamis, Second Edition. Springer International Publishing AG Switzerland. 2016. 388 p.

2. *Соловьев С.Л.* Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов. Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С.7–50.

3. *Гусяков В.К.* Цунами на дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика, 2016. Т.57. №9. С. 1601–1615.

4. *Носов М.А.* О направленных свойствах диспергирующих волн цунами, возбуждаемых поршневой и бегущей подвижками дна // Вулканология и сейсмология, 1997. №6. С.58–64.

5. *Nosov M.A.* Tsunami generation in compressible ocean //Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 1999. V. 24. №. 5. P.437–441.

6. *Носов М.А.* О возбуждении цунами в сжимаемом океане вертикальными подвижками дна //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. №. 5. С. 718–726.

7. *Nosov M.A., Skachko S.N.* Nonlinear tsunami generation mechanism // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2001. V. 1. P. 251–253.

8. *Носов М.А., Колесов С.В.* Нелинейный механизм формирования цунами в океане в приближении сжимаемой жидкости // Вестник Московского университета, Серия 3. Физика. Астрономия, 2005. №3. С. 51–54.

9. *Носов М.А., Колесов С.В., Остроухова А.В. и др.* Упругие колебания водного слоя в очаге цунами // Доклады Академии Наук. 2005, Т. 404, №2. С. 255–258.

10. *Nosov M.A., Kolesov S.V.* Optimal initial conditions for simulation of seismotectonic tsunamis // Pure and Applied Geophysics, 2011. V.168(6–7). P. 1223–1237.

11. *Nosov M.A., Bolshakova A.V., Kolesov S.V.* Displaced water volume, potential energy of initial elevation and tsunami intensity: analysis of recent tsunami events // Pure and Applied Geophysics. 2014. V.171. P. 3515–3525.

12. *Nosov M.A., Karpov V.A., Kolesov S.V. et al.* Relationship between pressure variations at the ocean bottom and the acceleration of its motion during a submarine earthquake // Earth, Planets and Space. 2018. 70: 100. P. 1–13.

13. *Nosov M., Karpov V., Sementsov K. et al.* Approbation of the method for examining the performance of seafloor observatory sensors using distant earthquakes records // Frontiers in Earth Science, 2021. 9:661337. P. 1–9.

14. *Sementsov K.A., Nosov M.A. Kolesov S.V. et al.* Free gravity waves in the ocean excited by seismic surface waves: Observations and numerical simulations // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019. 124. P. 8468–8484.

15. *Носов М.А., Нурисламова Г.Н., Мошенцева А.В. и др.* Остаточные гидродинамические поля при генерации цунами землетрясением // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 5. С. 591–603.

16. *Колесов С.В., Носов М.А.* Опыт эксплуатации автоматической системы оценки цунамиопасности землетрясения Tsunami Observer // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2019. № 6. С. 96–105.

# РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МОРСКИХ ЛЬДОВ

*С.А. Огородов*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*
ogorodov@geogr.msu.ru

Морские льды как зональный фактор играют важную роль в динамике рельефа прибрежно-шельфовой зоны замерзающих морей. Расширяющееся освоение Арктики, Дальнего Востока и Каспия, строительство различных объектов инфраструктуры (подходные каналы, резервуарные парки, терминалы, буровые платформы, подводные трубопроводы и кабели связи) как на берегах, так и на шельфе требуют нового уровня знаний о влиянии морских льдов на динамику рельефа берегов и дна. Так при проектировании подводных трубопроводов и кабелей связи в арктических и других замерзающих морях необходимы достоверные оценки интенсивности воздействий ледяных торосистых образований на дно и глубины их внедрения в грунт. Недооценка величин экзарации дна может привести к повреждению инженерных сооружений, в тоже время излишнее заглубление объектов сильно удорожает их строительство.

Необходимо отметить, что в нашей стране в советский период вопросы взаимодействия морских льдов с берегами и дном вплоть до последнего времени практически не исследовались. За рубежом, в США и Канаде, это направление, напротив, получило приоритетное развитие. Работы американских и канадских исследователей были начаты с выявления и систематизации сведений о пропашках дна (экзарации), образуемых стамухами и торосами. Первые детальные исследования в этом направлении проведены на шельфе Аляски [1, 2]. Систематические исследования всего комплекса процессов, связанных с прямым и косвенным воздействием морских льдов на дно и берега, ведутся начиная с 70-х годов прошлого века Американской геологической службой в рамках работ по изучению морфо- и литодинамики береговой зоны моря Бофорта [3]. В нашей стране специальные исследования ледового выпахивания фактически стартовали лишь в начале нового столетия и были приурочены к участкам строительства подводных трубопроводов: Байдарацкая и Обская губы Карского моря, Печорское море, шельф Сахалина, Северный Каспий [4, 5, 6,7].

Воздействия морских льдов на берега и дно можно разделить на 2 группы [8]: (1) косвенное, когда морской лед выступает в качестве фактора, регулирующего волно-энергетический режим в береговой зоне и, соответственно, условия абразии берегов и транспорта наносов на подводном склоне; (2) прямое, включающее экзарацию берегов и дна, транспорт наносов морскими льдами, местный размыв дна, обусловленный особенностями ледовых условий, формирование мерзлых пород в контактной зоне лед-дно. Косвенное или пассивное воздействие морских льдов на динамику берегов и дна замерзающих морей выражается в защитной роли припая и дрейфующих льдов от воздействия волн и приливов. Блокируя береговую зону в течение большей части года, припай регулирует действие активных гидродинамических факторов, сокращая время их проявления [9]. В летний период стамухи, фрагменты припая и битый однолетний лед, вынесенные на пляж, способны длительное время препятствовать подходу волн к приурезовой зоне, защищая берег от их прямого воздействия. Наличие плавучих льдов вблизи берега также приводит к существенному падению энергии волн и даже полному их гашению. Среди видов прямого воздействия морских льдов важнейшее место занимает экзарация, которая относится к категории опасных процессов. Согласно определению,

экзарация – деструктивное механическое воздействие льдов на подстилающую поверхность, связанное с динамикой ледяного покрова, в процессе которого осуществляется пропашка дна торосистыми образованиями или айсбергами [10]. Экзарация морскими льдами захватывает участки берега от первого десятка метров выше уровня моря на суше до глубины 15–30 м, а в ряде регионов даже до глубин 50–60 м. Прямыми наблюдениями с подводных лодок документально зафиксированы кили крупных торосистых образований, достигающие глубины 50 м [11]. Очевидно, что айсберги способны воздействовать дно и на больших глубинах (до 150–250 м). Борозды, образующиеся в результате выпахивания, могут достигать первых метров по глубине, десятков метров – по ширине, и нескольких километров в длину. Как уже было отмечено – оценка интенсивности ледово-экзарационных воздействий – является одной из наиболее актуальных задач современной науки и практики.

Обобщение и анализ многочисленных зарубежных источников и результатов собственных исследований на объектах обустройства инфраструктуры в прибрежно-шельфовой зоне замерзающих морей позволили разработать новые теоретические положения и дать исчерпывающую характеристика рельефообразующей деятельности морских льдов [10]: выполнено описание морфологических и морфометрических признаков форм и микроформ рельефа, образовавшихся в результате динамических воздействий морских льдов; получены оценки сохранности форм ледово-экзарационного рельефа; предложена наиболее полная на сегодняшний день типизация видов воздействий морских льдов на берега и дно; составлена схема районирования прибрежно-шельфовой зоны типичного замерзающего моря по видам и интенсивности рельефообразующих воздействий морских льдов; разработана технология мониторинга и оценки интенсивности воздействий ледяных образований на берега и дно замерзающих морей; определены факторы региональной дифференциации интенсивности воздействий морских льдов на берега и дно; выполнены оценки влияния изменений климата на интенсивность экзарации дна ледяными образованиями; раскрыты причинно-следственные связи, определяющие динамику морских берегов в условиях изменения климата и ледовитости. Полученные результаты и разработанные технологии внедрены при проектировании и строительстве объектов обустройства прибрежно-шельфовой зоны в замерзающих морях России: в Арктике, на Дальнем Востоке и на Каспии.

1. *Carsola, A.J.* Extent of glaciation on the continental shelf in the Beaufort Sea // Amer. J. Sci. 1954. V. 252. No 6. P. 366–371.

2. *Rex, R.W.* Microrelief produced by sea ice grounding in the Chukchi Sea near Barrow, Alaska // Arctic. 1955. V. 8. No 3. P. 177–186.

3. *Reimnitz, E., Barnes, P.W.* Sea ice as a geologic agent on the Beaufort Sea shelf of Alaska // The Coast and Shelf of the Beaufort Sea / Eds.: J.C. Reed et al. 1974. P. 301–353.

4. *Ogorodov, S., Arkhipov et al.* Ice effect on coast and seabed in Baydaratskaya Bay, Kara Sea // Geography, Environment, Sustainability, 2013, N. 03 [v. 06., P. 32–50.

5. *Ogorodov, S.A., Kamalov, A.M. et al.* The role of sea ice in coastal and bottom dynamics in the Pechora Sea // Geo-Marine Letters., 2005, Vol. 25, N 2–3, P. 146–152.

6. *Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузмичев К.В.,* Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. М.: "Институт Гипростроймост", 2005, 208 с.

7. *Ogorodov, S.A. and Arkhipov, V.V.* Caspian Sea Bottom Scouring by Hummocky Ice Floes // Doklady Earth Sciences, 2010, Volume 432, Part 1, P. 703–708.

8. *Ogorodov, S.A.* The Role of Sea Ice in the Coastal Zone Dynamics of the Arctic Seas // Water Resources, 2003, Vol. 30, N 5, P. 509–518.

9. *Каплин П.А.* Особенности динамики и строения берегов полярных морей // Новые исследования береговых процессов. М.: Наука, 1971. С. 22–34.

10. *Огородов С.А.* Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны, М.: Изд-во Московского университета, 2011, 173 с.

11. *Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. М.:Наука, 1994. 448с.

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ СТРАТИФИКАЦИЯХ И В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*И.А. Репина*

ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», *г. Москва*
repina@ifaran.ru

Исторически сложилось, что при разработках блоков взаимодействия атмосферы и поверхности для моделей Земной системы основное внимание уделяется процессам над сушей. Хотя климатическая значимость океана не вызывает сомнений, считается что он более однороден и, соответственно, более прост в представлении подсеточных процессов. Как и в случае поверхности суши, традиционные параметризации атмосферного пограничного слоя для океана основаны на теории подобия и коэффициентах турбулентного переноса, описывающих взаимодействие атмосферы с морской поверхностью [1]. Главные их недостатки, – неприменимость к экстремальным условиям стратификации и к течениям над сложными поверхностями (такими как морской лед, граница берег-море или штормовое море) – не удаётся устранить, оставаясь в рамках классической теории, т.е. с помощью уточнения функций подобия или введения дальнейших поправок в традиционные турбулентные замыкания. Недостаточное знание структуры приводного слоя атмосферы и обмена количеством движения, теплом и влагой с взволнованной водной поверхностью при различных стратификациях атмосферы является в настоящее время основным препятствием для правильного функционирования оперативных, глобальных и региональных моделей прогноза погоды и экспертных моделей для климата и его изменений. В частности, трудности, связанные с параметризацией обменных процессов в прибрежных зонах и полярных районах, являются в настоящее время основным препятствием для моделирования и прогнозирования погодных, в том числе опасных, явлений и климатических изменений в этих районах.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований структуры и динамики пограничного слоя атмосферы в условиях существования долгоживущих устойчивых и конвективных пограничных слоев, а также при наличии поверхностных неоднородностей различного типа: сликов на морской поверхности, морского льда различной структуры. Особое внимание уделяется исследованию прибрежных регионов.

Показано, что стратификация атмосферы влияет на ход обменных процессов в системе океан-атмосфера, и ее учет необходим при разработке климатических моделей [2–4]. Экспериментально подтверждена зависимость коэффициентов обмена от стратификации атмосферы. В частности, уменьшением коэффициента сопротивления с увеличением скорости ветра при неустойчивой стратификации объясняется тот факт, что при конвективных условиях динамическая скорость нулю не равна. Также установлена зависимость параметра шероховатости атмосферы от ее устойчивости. С этим связано явление выглаживания морской поверхности при апвелингах и уменьшение параметра шероховатости в полярных районах, для которых характерны долгоживущие устойчивые пограничные слои. Данные натурных наблюдений также подтверждают, что турбулентность может существовать и при числах Ричардсона выше критического.

Исследовано влияния стратификации на морское волнение и экспериментально подтверждена необходимость ввода поправки на состояние атмосферы в формулы для расчета элементов ветровых волн. При неустойчивом состоянии атмосферы процесс

развития ветровых волн ускоряется во времени и сокращается по разгону. При устойчивом состоянии – наоборот. Разница в предельных значениях разгона и времени весьма существенна.

Изучение воздействия пленок поверхностно-активных веществ и нефтепродуктов на характеристики ветровых волн и динамику приводного слоя атмосферы в настоящее время представляет значительный интерес, прежде всего, в связи с задачами спутникового мониторинга океана, разработкой дистанционных методов идентификации и диагностики техногенных загрязнений различных акваторий, а также зон повышенной биологической продуктивности. Установлено, что изменяя физические свойства нижней границы приводного атмосферного погранслоя, пленки влияют на обмен импульсом, теплом и веществом между атмосферой и морем. Пленка не влияет на волны зыби, но подавляет ветровые волны с высокими частотами. Поэтому над пленкой наблюдается уменьшение интенсивности потока импульса именно в высокочастотной области. Оценка таких эффектов представляет очевидный интерес и для развития оперативных моделей прибрежных акваторий, включая моделирование экосистем, и для климатических исследований.

Для полярных районов установлено, что коэффициент сопротивления нелинейно зависит от сплоченности ледяного покрова, относительной площади снежниц на поверхности, от пространственного расположения и высоты торосов, а также от стратификации атмосферы.

В прибрежных зонах возникают сложные ветровые циркуляции, а при береговых ветрах над морем формируются переходные внутренние пограничные слои, связанные с неоднородностью геометрических и термических свойств поверхности. Профили средней скорости ветра и интенсивность турбулентности в этом случае существенно отличаются от характеристик пограничного слоя, типичного для условий открытого моря или прибрежных зон с ровным рельефом береговой линии [5]. Также причиной неоднородности турбулентных полей является порывистость сильных береговых ветров и наличие мезомасштабных циркуляций (внутренних атмосферных волн, бризовых явлений и пр.).

Анализ измерений, проведенных на морском побережье при переходе воздушного потока с берега на морскую поверхность и наоборот, показал, что его коэффициент сопротивления и суточная изменчивость зависят от направления ветра и характеристик подстилающей поверхности. Благодаря проведенным исследованиям был сделан вывод, что затруднения применимости классических теорий подобия над неоднородными ландшафтами связано, прежде всего, с тем, что к локальному турбулентному перемешиванию, вызванному высокочастотной турбулентностью, здесь добавляются нелокальные процессы, обусловленные неоднородностью генерации турбулентных движений и различными мезомасштабными циркуляциями.

Результаты работы могут быть использованы для анализа данных дистанционного зондирования и при расчетах характеристик взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности в региональных и климатических моделях.

1. *Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B.* Bulk parameterization of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm //Journal of climate, 2003. V. 16 (4). P. 571–591.

2. *Zilitinkevich S.S., Kadantsev E., Repina I., Mortikov E., Glazunov A.* Order out of chaos: Shifting paradigm of convective turbulence // Journals of the Atmospheric Sciences, 2021. V. 78. P. 3925–3922.

3. *Zilitinkevich S., Druzhinin O., Glazunov A., Kadantsev E., Mortikov E., Repina I., Troitskaya Yu.* Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stably stratified sheared flows // Atmospheric Chemistry and Physics, 2019. V. 19. P. 2489–2496.

4. *Repina I., Artamonov A., Chukharev A., Esau I., Goryachkin Y., Kuzmin A., Pospelov M., Sadovsky I., Smirnov M.* Air-sea interaction under low and moderate winds in the black sea coastal // Estonian Journal of Engineering, 2012. V. 18 (2). P. 89–101.

5. *Репина И.А., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Козырев А.В.* Экспериментальное исследование коэффициента сопротивления морской поверхности при сильных ветрах // Морской гидрофизический журнал, 2015, №1. С. 53–63.

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ, СКРЫТНОСТИ И ЗАЩИТЫ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

*А.А. Родионов*

Санкт-Петербургский филиал
ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», *г. Санкт-Петербург*
arodionov@ioras.nw.ru

Тесная взаимосвязь Военно-Морского Флота России и Академии наук прослеживается на протяжении последних трех веков истории нашего государства. Значительная часть фундаментальных открытий в области океанологии была сделана членами Академии при решении задач Флота. В современных условиях возрастающего противостояния России и стран Запада объективно повышается востребованность результатов фундаментальных и прикладных исследований Академии наук в интересах повышения эффективности сил и технических средств ВМФ [1, 2]. Доклад посвящен научным основам решения задач борьбы с подводными объектами противника и обеспечения боевой устойчивости отечественных подводных сил.

Анализ мировых тенденций изменения тактических характеристик средств подводного наблюдения свидетельствует о снижении возможностей гидроакустических средств и возрастании интереса за рубежом к гидрофизическим средствам [3]. По имеющимся косвенным данным такими средствами располагают ВМС стран НАТО.

Для решения задач подводного наблюдения и обеспечения скрытности и защиты отечественных объектов необходимо проведение фундаментальных исследований по изучению физполей объектов и разработке моделей морской среды и гидрофизических возмущений [4]. В прикладных исследованиях должны быть обоснованы технические предложения по созданию соответствующих устройств. В докладе представлены материалы по моделям Баренцева моря, Курильской гряды и обтекания неоднородностей рельефа дна, свидетельствующие о возможностях научных подходов к решению поставленных проблем.

Для Баренцева моря в СПбФ ИО РАН разработана высокоразрешающая модель с шагом по горизонтали от 366 м до 3015 м, по глубине от 12 м до 47 м [5]. Для акваторий Курильской гряды (см [6]) реализована задача в гидростатической постановке для всей гряды, а для Четвертого Курильского пролива в полной негидростатической постановке с горизонтальным разрешением 245–1050 м и 71 σ-уровнем по вертикали.

Сравнение модельных и натурных данных показало их удовлетворительное соответствие. Численная реализация моделей позволила описать особенности динамики морской среды в заданных акваториях вплоть до субмезомасштабов. В том числе показано, что в проливных зонах с изрезанным рельефом дна учет динамической компоненты давления уточняет существенно значения горизонтальных компонентов скорости; ее влияние на уровень может проявиться качественно, меняя направление транспорта (на примере Четвертого Курильского пролива). Это несоответствие обязано избыточной нелинейности в гидростатической постановке при высоких скоростях взаимодействия прилива и огибающего течения.

Моделирование обтекания двухслойной жидкостью неоднородности рельефа дна (полусфера) выполнено в трех вариантах: на основе уравнений, осредненных по Рейнольдсу (RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes), метода моделирования крупных вихрей (LES –

Large Eddy Simulations) и RANS-LES [7, 8]. Показано, что процесс обтекания является нестационарным с образованием когерентных вихревых структур, сходящих с препятствия с частотой, соответствующей числам Струхаля St=0,75 (Fr=0,0017), 0,65 (Fr=0,0068) и St=0,66 (Fr=0,0272) (инвариантность процессов обтекания препятствия при изменении скорости набегающего потока); характерные масштабы вихревых структур лежат в пределах 0,5–1 диаметра препятствия; длины внутренних волн находятся в диапазоне 2–3 диаметров препятствия; при скорости потока, сравнимой со скоростью свободных внутренних волн, вихревые структуры вносят значимый вклад в волновое поле, с увеличением скорости набегания превалируют волны от вихревых структур.

При решении задач обеспечения защиты подводных объектов одним из основных требований является оперативность применения средств уничтожения опасных целей. Это может быть достигнуто при высоких скоростях поражающих элементов. В рамках нелокальной гидродинамики обоснованы основные закономерности движения тел с околозвуковыми скоростями под водой и в совместных работах с сотрудниками Томского государственного университета выполнены подтверждающие эксперименты [9, 10].

Выполненные исследования имеют общенаучное значение и вместе с тем показывают, что развитие фундаментальных и прикладных исследований может быть важным фактором повышения эффективности систем освещения подводной обстановки и обеспечения защиты и скрытности подводных объектов.

1. *Родионов А.А., Алферов Ж.И. и др.* Наука СанктПетербурга и Морская мощь России. Т. 1. СПб.: «Наука», 2001; *Родионов А.А., Алферов Ж.И. и др.* Наука Санкт-Петербурга и Морская мощь России. Т. 2. СПб.: «Наука», 2003.

2. *Родионов А.А.* Фундаментальная гидромеханика и решение проблем военно-морского флота России // Сильно неравновесные процессы в механике неоднородных сред. Межвуз. сб. Физическая механика. Вып. 9. СПб.: ВВМ, 2018. С. 201–212.

3. *Стефаник Т.* Неакустические методы обнаружения подводных лодок // В мире науки, 1988. Перевод с англ.: Tom Stefanick. The nonacoustic detection of submarines // Scientific American, 1988. V. 258 (3).

4. *Родионов А.А., Коваленко В.В., Ванкевич Р.Е.* Методические основы построения систем оперативной океанографии в приложении к задачам подводного наблюдения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. № 3. С. 4–19.

5. *Родионов А.А.* Океан и атмосфера в исследованиях санкт-петербургских океанологов. 55 лет Санкт-Петербургскому филиалу Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 4. С. 3–4.

6. *Родионов А.А., Андросов А.А., Фофонова В.В., Кузнецов И.С., Вольцингер Н.Е.* Моделирование приливной динамики северных проливов Курильской гряды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. № 3. С. 20–34.

7. *Ванкевич Р.Е., Родионов А.А.* Численное исследование закономерностей генерации субмезомасштабных возмущений при обтекании элементов подводного рельефа // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 4. С. 27–38.

8. *Родионов А.А., Ткаченко И.В. и др.* Эффекты нестационарности обтекания равномерно движущегося погруженного тела // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 4. С. 3–8.

9. *Родионов А.А., Ищенко А.Н. и др.* Высокоскоростное движение под водой. Теория и эксперимент // Труды 12-й Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2014.

10. *Родионов А.А., Ищенко А.Н. и др.* Исследование высокоскоростного движения суперкавитирующих тел в воде и их взаимодействия с подводными преградами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 4. С. 5–10.

# КРУПНОМАСШТАБНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД СУБПОЛЯРНОЙ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ И ЕЕ КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

*А.В. Соков*

ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», *г. Москва*
sokov@ocean.ru

Актуальность темы определяется ключевой ролью крупномасштабной циркуляции вод Северной Атлантики в формировании изменений глобального климата. Известно, что перенос вод и интенсивные процессы обмена на границе океан–атмосфера в северной части Атлантического океана определяют значительную долю естественной долгопериодной климатической изменчивости. Так как количество тепла, переносимое океанскими течениями на север (~$1 \cdot 10^{15}$ Вт), сопоставимо с меридиональным переносом тепла в атмосфере, даже небольшие изменения интенсивности циркуляции вод в этом регионе могут способствовать формированию климатических аномалий в умеренных и высоких широтах Северного полушария.

В качестве основных данных использованы повторные высокоточные наблюдения на океанографических разрезах, которые обладают рядом неоспоримых преимуществ перед другими данными наблюдений и все еще остаются единственно возможным достоверным экспериментальным методом исследования долговременной изменчивости характеристик водных масс и циркуляции вод океана. Впервые проведен анализ всех доступных трансатлантических разрезов в Северной Атлантике, что позволило описать междекадную изменчивость термохалинной циркуляции вод в Атлантике.

Установлена причина разнонаправленной тенденции изменчивости термохалинной структуры вод субполярной и субтропической Северной Атлантики, выявленной в ходе реализации международной программы WOCE. На основании расчета количественных значений изменчивости температуры и солености в Северной Атлантики, оценки скорости распространения Лабрадорской водной массы и характера долгопериодной изменчивости характеристик ядра Лабрадорской водной массы в источнике ее формирования в море Лабрадор было показано, что причиной разнонаправленных тенденций изменчивости промежуточных слоев Северной Атлантики является изменчивость характеристик ядра Лабрадорской воды в источнике формирования и разница во времени ее распространения по акватории Северной Атлантики. На основании расчета переносов вод были построены схемы циркуляции поверхностного, промежуточного, глубинного и придонного слоев Северной Атлантики для трех десятилетий (1950-е, 1980-е и 1990-е гг.). Показано существование значительной изменчивости циркуляции на всех глубинах, что делает неправомерным построение общей схемы циркуляции Северной Атлантики, построенной по данным из разных десятилетий. Установлено существование двух мод глобальной конвективной меридиональной циркуляции в Северной Атлантике на протяжении этого периода. Выявлены механизмы, отвечающие за смену режимов меридиональной циркуляции. Установлена, что интенсификация меридиональной циркуляции находится в противофазе с интенсивностью образования Лабрадорских вод.

Главным результатом его исследований является создание концепции существования режимов циркуляции вод Северной Атлантики во второй половине XX века, включающей описание различных состояний (режимов) меридиональной термохалинной циркуляции в регионе и количественные оценки изменчивости крупномасштабных потоков воды и тепла. Он установил роль и описал механизм

воздействия Лабрадорской водной массы на интенсивность меридиональной термохалинной циркуляции в Северной Атлантике.

Кроме того, установлен новый район глубоководной конвекции в море Ирмингера . Зарегистрирована рекордно глубокая конвекции, начиная с 2015 г., которая сопровождается интенсификацией меридиональной циркуляции.

Выявлена необходимость постоянного мониторинга динамики вод в субполярной Атлантике на границе с Арктикой для выяснения механизма смены обнаруженных режимов меридиональной циркуляции. И такой мониторинг налажен на 60° с.ш. С 1997 г., проводятся ежегодные измерения , выполнено 28 рейсов НИС ИО РАН . Это самый наблюдаемый трансокеанский разрез в Мировом океане.

Разработана система постоянного автоматического мониторинга вод на 60° с.ш. при помощи автономных буйковых станций.

# АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ОКЕАНСКОГО КОНВЕЙЕРА: ЮЖНЫЙ ОКЕАН И АБИССАЛЬНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ

*Р.Ю. Тараканов*

ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», *г. Москва*
rtarakanov@gmail.com

Глобальный океанский конвейер (ГОК) представляет собой такой элемент Глобальной циркуляции Мирового океана, который связывает термоклин с более плотными водами абиссали. Согласно популярной концепции Брекера [1], компенсация опускания в Северной Атлантике вод из термоклина в абиссаль происходит в рамках ГОК в ходе медленного движения на обширных акваториях Тихого и Индийского океанов. Однако даже автором этой работы указывалось, что существующей интенсивности вертикального турбулентного перемешивания в открытом океане для такой компенсации недостаточно. С современной, все более популярной точки зрения, такая компенсация имеет место в Южном океане, где глубинные северо-атлантические воды в ходе своего изопикнического подъема из глубины в полосе Антарктического циркумполярного течения выходят к поверхности океана. Этот подъем обусловлен ветровым апвеллингом, существующим повсеместно в АЦТ. После выхода к поверхности часть этих вод вовлекается в направленный на север перенос в поле чисто дрейфового течения, в ходе которого за счет прогрева, превышения осадков над испарением и ледотаяния над ледообразованием, собственно, и происходит обратный переход из абиссали в термоклин, замыкающий северо-атлантическую ячейку ГОК. Другая часть поднявшихся из глубины вод в Южном океане еще больше охлаждается, доуплотняется и опускается ко дну, формируя антарктические донные воды. Эти воды распространяются на север на бóльшей части акватории Мирового океана, за исключением Арктики и некоторых районов Северной Атлантики, образуя, тем самым, нижнюю ветвь антарктической ячейки ГОК. В результате смешения антарктических донных вод с вышележащими глубинными водами происходит замыкание этой ячейки ГОК. Первая явная схема ГОК, исходящая из описанной идеи и основанная на обобщении большого количества публикаций и собственных расчетов баланса переноса поперек Субантарктического фронта, опубликована в работе [2].

Одной из составляющих баланса переноса вод через Субантарктический фронт, наряду с чисто дрейфовым течением и геострофическими течениями в абиссали океана ниже пересекающих линию фронта гребней подводных хребтов, является вихревой перенос как в термоклине, так и в абиссали [2]. Вихри формируются за счет бароклинной неустойчивости струйных течений, к числу которых относится и АЦТ. При этом Субантарктическое течение (фронт), Южное полярное течение и Южное антарктическое течение являются отдельными струями АЦТ. Таким образом исследования струй и вихрей АЦТ являются важными аспектами изучения ГОК.

На сегодняшний день большой ряд публикаций не показывает наличия систематического долгосрочного меридионального сдвига струй АЦТ (см. обзор в [3]). Однако недавнее исследование сектора Южного океана к югу от Африки по данным спутниковой альтиметрии [4] показало наличие существенного меридионального сдвига Субантарктического и Южного полярного течений за 26-летний период наблюдений (с 1993 по 2018 гг.) до 0.4°ш. на юг и 1.4°ш. на север соответственно. Получить такую оценку позволила разработанная автором оригинальная методика анализа данных.

В статье [5] был предложен собственный оригинальный алгоритм выделения замкнутых многоядерных циркуляций (включая всю структуру вложенных циркуляций) на картах динамической топографии, построенных по данным спутниковых измерений. На широтах АЦТ такие циркуляции интерпретируются как вихри. Существующие на сегодняшний день альтернативные алгоритмы выделяют либо многоядерные циркуляции без анализа их внутренней структуры, либо только одноядерные циркуляции.

Опоясывающее с запада на восток антарктический континент АЦТ связывает воедино всю глобальную циркуляцию Мирового океана и является важным элементом в рамках ГОК, где происходит подъем северо-атлантических вод к поверхности океана. Единственным районом, где АЦТ распространяется от одного континентально склона до другого является пролив Дрейка. В работе [6] было выполнено обобщение данных экспедиционных исследований, проводившихся ИО РАН в этом районе в 2003–2011 гг. В частности, было показано, что АЦТ распространяется не до дна, как это традиционно считается, а до глубины 2000–2500 м в осевой части, соответствующей Полярному фронту, и до 1000–1500 м на южной и северной периферия течения. При этом на бóльших глубинах формируется весьма интенсивная абиссальная циркуляция, управляемая сложным рельефом дна района. Эта циркуляция является по сути частью системы Глубинного западного пограничного течения, несущего антарктические воды на север в абиссали Западной Атлантики.

Перенос антарктических вод на север в абиссали океана представляет собой нижнюю ветвь антарктической ячейки ГОК. Переток этих вод из котловины в котловину, как правило, сосредотачивается в узких зонах (разломах, каналах, глубоководных проходах), связывающих котловины. В таких зонах баланс сил, управляющий потоком, зачастую отличается от баланса сил в открытой части океана. Здесь реализуется режим гидравлически управляемого перетока. В результате на отдельных участках глубоководных каналов происходит очень резкое (на порядки!) увеличение вертикального турбулентного перемешивания, что делает их важными районами для поддержания существующей плотностной стратификации в абиссали Мирового океана. Таким образом проведение исследований потока придонных антарктических вод оказывается наиболее удобным и актуальным именно в таких местах. На протяжении 2002–2021 гг. силами ИО РАН выполнялись целенаправленные исследования потоков антарктических вод в абиссальных каналах Атлантики. Результаты этих работ были обобщены в двух монографиях [7, 8].

1. *Broecker W.S.* The biggest chill // Natural History Mag., 1987, V. 97, P. 74–82.

2. *Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю.* Перенос воды через Субантарктический фронт и Глобальный океанский конвейер // Океанология, 2011, Т. 51, № 5, С. 773–787.

3. *Chapman C.C., Lea M.A., Meyer A., et al.* Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate // Nat. Clim. Change, 2020, V.10, P. 210–219

4. *Tarakanov R.Yu.* On the long-term linear meridional shift of the jet structure of the Antarctic Circumpolar Current south of Africa // Oceanology, 2021, V. 61, №6., P. 815–829.

5. *Тараканов Р.Ю.* О выделении замкнутых циркуляций на спутниковых картах динамической топографии поверхности океана // Изв. РАН. Физ. Атм. Океана, 2019, Т. 55, № 5, С. 114–125

6. *Тараканов Р.Ю.* Море Скотия и пролив Дрейка как орографический барьер для Антарктического циркумполярного течения // Океанология, 2012, Т. 52, № 2, С. 176–189

7. *Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean // Ed. Weatherly G. Dordrecht: Springer 2010. 266 p.

8. *Morozov E.G, Tarakanov R.Y., Frey D.I.* Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic Ocean // Springer Cham, 2021.

# МОРСКИЕ БРЫЗГИ ПРИ СИЛЬНОМ ВЕТРЕ: МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РОЛЬ В ДИНАМИКЕ ШТОРМОВ

*Ю.И. Троицкая*

ФГБУН «Институт прикладной физики РАН», *г. Нижний Новгород*
yuliya@ipfran.ru

Морские погодные системы со штормовыми и ураганными ветрами и осадками представляют существенную проблему для прибрежных территорий и морской деятельности. Самыми опасными морскими погодными явлениями считаются тропические циклоны (ТЦ), в которых скорость ветра может превышать 70 м/с. Часто ТЦ становится источником интенсивного внетропического циклона умеренных широт, несущего очень много влаги. На Дальнем Востоке выход таких экс-тропических циклонов является причиной сильных наводнений и интенсивных штормов в Дальневосточных морях. Эпизоды аномально сильного ветра в Арктической зоне наблюдается при вторжениях холодного воздуха из центральных районов Арктики или с суши в области океана, свободные ото льда: такие условия являются благоприятными для развития полярных депрессий (ПД) [1], в которых скорости ветра достигают 35–40 м/с. Сокращение площади морских льдом привело к тому, что ПД в последнее время их регистрируют вдоль всего Северного морского пути [2]. Высокие значения скорости ветра и связанные с ними ветровые нагрузки представляют собой основной фактор штормов и ураганов. С этим связаны высокие требования к качеству моделирования штормовой погоды.

За последние 20 лет был достигнут значительный прогресс в прогнозировании траекторий штормов, в то время как прогноз интенсивности по-прежнему проблематичен [3] особенно для наиболее интенсивных быстро развивающихся штормов, где максимальная скорость ветра часто занижается более чем вдвое [4]. Это связано с тем том, что интенсивность урагана определяется многими факторами, в том числе взаимодействием атмосферы и океана, которое при очень сильном ветре плохо изучена особенно на мелких масштабах.

В настоящем сообщении представлен прогресс, достигнутый в понимании и описании «микромасштабных» процессов в пограничных слоях океана и атмосферы, брызг, пены и обрушения волн (их физических свойств, обусловленных ими потоках из океана в атмосферу, влиянии на развитие океанских штормов) и связанные с этим проблемы и вопросы.

Ранее на основе лабораторных экспериментов с применением высокоскоростной видеосъемки нами были выделены три механизма образования брызг: фрагментация жидких нитей, разрывы подводных пузырьков и дробление по типу «парашют» [5]. Предложена простая аналитическая модель инициации такого типа дробления [6]. В рамках модели получено уравнение, описывающее начальное возмущение в виде «нарастающей простой волны» (см. рисунок, левая панель), форма которой благоприятствует процессу фрагментации по типу «парашют».

Модель верифицирована в лабораторном эксперименте, предложено статистическое описание событий фрагментации. Показано, что средние размеры «парашютов» пропорциональны размерам «затравок», а их распределение описывается логнормальным законом. С учетом функции распределения по размерам брызг, генерируемых при одном событии фрагментации, построена функция генерации брызг, которая находится в хорошем согласии с данными независимых лабораторных

экспериментов (рисунок, правая панель). На основе данных лабораторных экспериментов о статистике событий фрагментации и натурных данных об обрушениях поверхностных волн построена параметризация статистики брызг и числа событий дробления по типу «парашют» по скорости ветра и разгону волнения, применимая в натурных условиях.

По данным экспериментов определено статистическое распределение по скоростям инжекции капель, образующихся при дроблении по типу «парашют». Полученные зависимости используются при инициации параметров капель в лагранжевой стохастической модели воздушного потока над взволнованной водной поверхностью, содержащего капли. В рамках модели учтены модифицированные на основе предложенных механизмов фрагментации функции генерации брызг, описывающие зависимость числа событий генерации от количества брызг. Параметры модели выбирались на основе сравнения с результатами прямого численного моделирования.

На основе расчетов в рамках ЛСМ предложены параметризации для турбулентных потоков тепла, влаги и импульса. Отмечено существенное влияние капель на профиль температуры приводного слоя атмосферы при условиях, типичных для тропического циклона. Предложенные параметризации потоков были использованы в осесимметричной негидростатической модели шторма [7]. Показано, что учет потоков, обусловленных «микромасштабными» процессами в пограничных слоях океана и атмосферы, заметно увеличивает интенсивность шторма.

1. *Kolstad E.W.* 2011. A global climatology of favourable conditions for polar lows. Q.J.R. Meteorol. Soc. 137: 1749–1761.

2. *Zabolotskikh, E. V. et al.* Polar lows over the eastern part of the Eurasian Arctic: the sea-ice retreat consequence // IEEE Geosci. and Remote Sens. Lett., 2016, №10, P. 1492

3. *Emanuel. K., F. Zhang*, 2016: On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts // J. Atmos. Sci, 2016, 73**, P.** 3739.

4. Komori, S., *et al.* Laboratory measurements of heat transfer and drag coefficients at extremely high wind speeds // *J. Phys. Oceanogr.*, 2018, 48, P.959.

5. Yu. Troitskaya, *et al.* Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // Sci. Rep. 2017, 7, P. 1614.

6. Yu. Troitskaya, *et al.*, "The Small-Scale Instability of the Air–Water Interface Responsible for the Bag-Breakup Fragmentation" // *J. Phys. Oceanogr.*, 2022, 52, P.1520

7. Rotunno, R., K.A. Emanuel, An air-sea interaction theory for tropical cyclones, Part II: Evolutionary study using axisymmetric nonhydrostatic numerical model // J. Atmos. Sci., 1987, 44, 542–561.

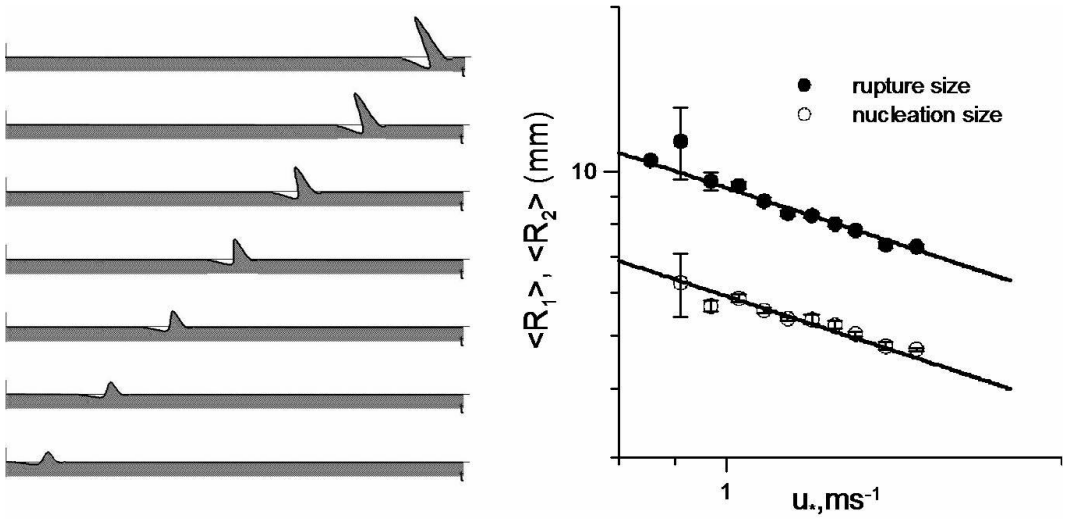



Рисунок. Решение в виде нарастающей простой волны, описывающее инициацию дробления по типу «парашют» и зависимость размера «парашюта» от динамической скорости ветра: эксперимент (символы) и теоретическое предсказание (линии)

# «ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, КЛИМАТОЛОГИЯ»

## БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ УГЛЕРОДА БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

*Е.А. Головацкая*

ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», *г. Томск*
golovatskayaea@gmail.com

Углеродный обмен между наземными экосистемами и атмосферой является одним из основных природных процессов, необходимость количественной оценки которого диктуется условиями Рамочной конвенции по климату, Киотского протокола и пост-киотских климатических соглашений [1]. С глобальной точки зрения биогеохимический цикл углерода – это комплекс процессов, в результате которых происходит перенос углерода между различными резервуарами (литосфера, биосфера, атмосфера). Динамика содержания парниковых газов ($CO_2$ и $CH_4$) в атмосфере является одной из наиболее актуальных проблем экологии, поскольку наблюдается постоянное увеличение их концентрации в атмосфере. Рост концентрации парниковых газов в атмосфере в основном связывают с антропогенной деятельностью. Одной из глобальных проблем исследования круговорота углерода является оценка баланса углерода в различных экосистемах, в том числе и болотных, определение роли отдельных элементов в углеродном балансе на биосферном уровне. Основными чертами углеродного цикла болотных экосистем являются незамкнутость и динамичность. Незамкнутость обусловлена способностью, закрепления С в стабильных пулах органического вещества (ОВ) торфа с временем пребывания >1000 лет (органо-минеральные комплексы). Динамичность обусловлена высокой чувствительностью к климатическим изменениям и возрастающему антропогенному воздействию.

По оценкам разных авторов на долю торфяных болот приходится около 3,5% поверхности земли, а мировые запасы торфа в углеродном эквиваленте составляют 120–455 млрд т углерода [2, 3]. На территории Западной Сибири болотные экосистемы занимают по разным оценкам от 36 до почти 50% площади, и в них содержится около 35% общего пула почвенного углерода России [4]. Болотные экосистемы являются единственными наземными экосистемами, способными на длительное время изымать углерод из атмосферы, депонируя его в виде торфяных залежей. В настоящее время болотные экосистемы служат стоком углерода из атмосферы, о чем свидетельствуют многочисленные оценки. Однако при изменении климатических условий или при антропогенном воздействии на болота они из стока могут превратиться в источник парниковых газов.

Исследования углеродного баланса олиготрофных и эвтрофных болот проводились на территории восточной части Обь-Иртышского междуречья, на двух основных ключевых участках «Бакчарский» (стационар «Васюганье» ИМКЭС СО РАН) и ключевой участок «Тимирязевский». Для оценки углеродного баланса мы изучали чистую первичную продукцию, скорость трансформации растений торфообразователей, эмиссию углекислого газа с поверхности болотных экосистем, оценивали суммарный годовой поток углерода и баланс углерода. Для региональной оценки проводили картирование территории ключевого участка на основании маршрутных исследований

и дешифрирования космоснимков. Общая площадь исследованной территории, включая новые ключевые участки составляет 112 тыс. км$^2$, из которых болотные экосистемы занимают 42 тыс. км$^2$. Общая заболоченность территории составляет 36%.

Оценка составляющих углеродного баланса ключевого участка показала, что олиготрофные болотные экосистемы в течение года накапливают 482 тыс. тонн углерода в год в виде первичной продукции растений, при этом из них выделяется около 350 тыс. тонн углерода. Эвтрофные болотные экосистемы накапливают 165 тыс. тонн углерода в год и выделяют 148 тыс. тонн углерода. Углеродный баланс олиготрофных и эвтрофных экосистем положителен и составляет 133 и 16 тыс. тонн углерода в год, соответственно, при этом накопление углерода на единицу площади болот составляет 79 и 38 гС/м$^2$ в год для олиготрофных и эвтрофных болот. Таким образом, исследованные болотные экосистемы Западной Сибири являются устойчивым стоком углерода из атмосферы. Динамика баланса углерода для крупных болотных массивов не имеет значимого тренда изменения за 11-летний период при высокой межгодовой изменчивости и наблюдаемых в этот период изменениях погодных условий.

На основании проведенных исследований потоков углерода были выявлены взаимосвязи между климатическими характеристиками и потоками углерода в болотных экосистемах, которые используются при построении локальных моделей, описывающих поведение потоков $CO_2$ в зависимости от степени антропогенной нагрузки и изменения климатических и экологических факторов. Сделан прогноз изменения скорости поглощения углерода при различных сценариях изменения климата. Согласно модельным расчетам к 2100 г. прогнозируется рост как рост эмиссии углерода, так и рост скорости накопления углерода. Показано, что сток углерода в естественные болотные экосистемы может увеличиться на 15–35% [5].

1. *IPCC, 2021*: Index. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.).. Cambridge University Press. In Press

2. *Вомперский С.Э.* Роль болот в круговороте углерода // Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука, 1994. С. 5–37.

3. *Gorham E.* Northern Peatlands: role in carbon cycle and probable responses to climatic warming // Ecological Appl. 1991. V. 1. P. 182–195. https://doi.org/10.2307/1941811

4. *Sheng Y, Smith L C, MacDonald G M, Kremenetski K V, Frey K E , Velichko A A, Lee M, Beilman D W and Dubinin P* 2004 Glob. Biogeochem. Cycles 18 GB3004

5. *Dyukarev E.A., Martynova Yu.V. Golovatskaya E.A.,* Assessment of the carbon balance of treed bogs under climate change with observation and modelling data 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 386 012028.

# ВОДЯНОЙ ПАР В РАДИАЦИОННОМ БАЛАНСЕ АТМОСФЕРЫ. КОНТИНУАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА

*И.В. Пташник*

ФГБУН «Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН», *г. Томск*
piv@iao.ru

Прогнозирование климата Земли невозможно без правильного учета радиационных процессов в атмосфере. Поглощение излучения в атмосфере Земли водяным паром абсолютно доминирует над другими газами от микроволн до видимого диапазон, обусловливая до 70% от общего поглощения солнечного излучения [1]. Являясь сильным парниковым газом, водяной пар также удваивает эффект нагрева поверхности Земли, вызванный любым другим фактором. Но помимо селективного поглощения миллионами линий, значительную роль в этом играет также слабоселективное или «континуальное» поглощение излучения водяным паром (или просто «континуум»), природа которого наименее изучена сегодня.

Актуальность исследований континуального поглощения водяным паром имеет как фундаментальный, так и прикладной аспект. Фундаментальный аспект состоит в том, что сама природа этого поглощения дискутируется уже более 50 лет. Двумя основными гипотезами на сегодня являются: а) совокупный вклад далеких «крыльев» сильных линий водяного пара и б) димеры воды, т.е. комплексы, состоящие из двух молекул воды, объединенных водородной связью. Прикладной аспект заключается в том, что именно континуум водяного пара в окнах прозрачности атмосферы в значительной степени определяет энергетический баланс Земли и влияет на климат. Между тем, на начало наших исследований, 20 лет назад, погрешность в знании величины континуума в некоторых спектральных участках достигала 100% [2].

В докладе будут представлены результаты широкомасштабных исследований континуума водяного пара за последние 20 лет, в ходе которых получены следующие результаты: 1) на основе экспериментов и результатов квантово-химических расчетов показано, что значительный вклад в континуум водяного пара обусловлен димерами воды [3–4]; 2) построена физическая модель континуума водяного пара в ИК полосах поглощения (рис. а) [4–5]; 3) выполнены уникальные измерения континуума в окнах прозрачности атмосферы (рис. б) [6]; 4) сделаны оценки влияния обновленного континуума водяного пара на расчет радиационного баланса атмосферы (рис. в) [7].

1. *Kiehl J., Trenberth K.* Earth’s annual global mean energy budget // Bull. Am. Meteorol. Soc., 1997. № 78. P. 197–208.

2. *Shine K., Ptashnik I., Rädel G.* The Water Vapour Continuum: Brief History and Recent Developments // Survey in Geophysics. 2012. № 33. P. 535–555.

3. *Ptashnik I.* Evidence for the contribution of water dimers to the near-IR water vapour self-continuum // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2008. № 109. 3. 831–852.

4. *Ptashnik I., Shine K., Vigasin A.* Water vapour self-continuum and water dimers: 1. Analysis of recent work // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, № 112. P. 1286–1303.

5. *Ptashnik I., Klimeshina T., Solodov A., Vigasin A.* Spectral composition of the water vapour self-continuum absorption within 2.7 and 6.25 μm bands // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2019. № 228. P/ 97–105.

6. *Ptashnik I., McPheat R, Shine K., Smith K., Williams R*. Water vapor self-continuum absorption in near-infrared windows derived from laboratory measurements // J. Geophys. Res. 2011. № 116, D16305.

7. *Rädel G., Shine K., Ptashnik I*. Global radiative and climate effect of the water vapour continuum at visible and near-infrared wavelengths // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2015. № 141.

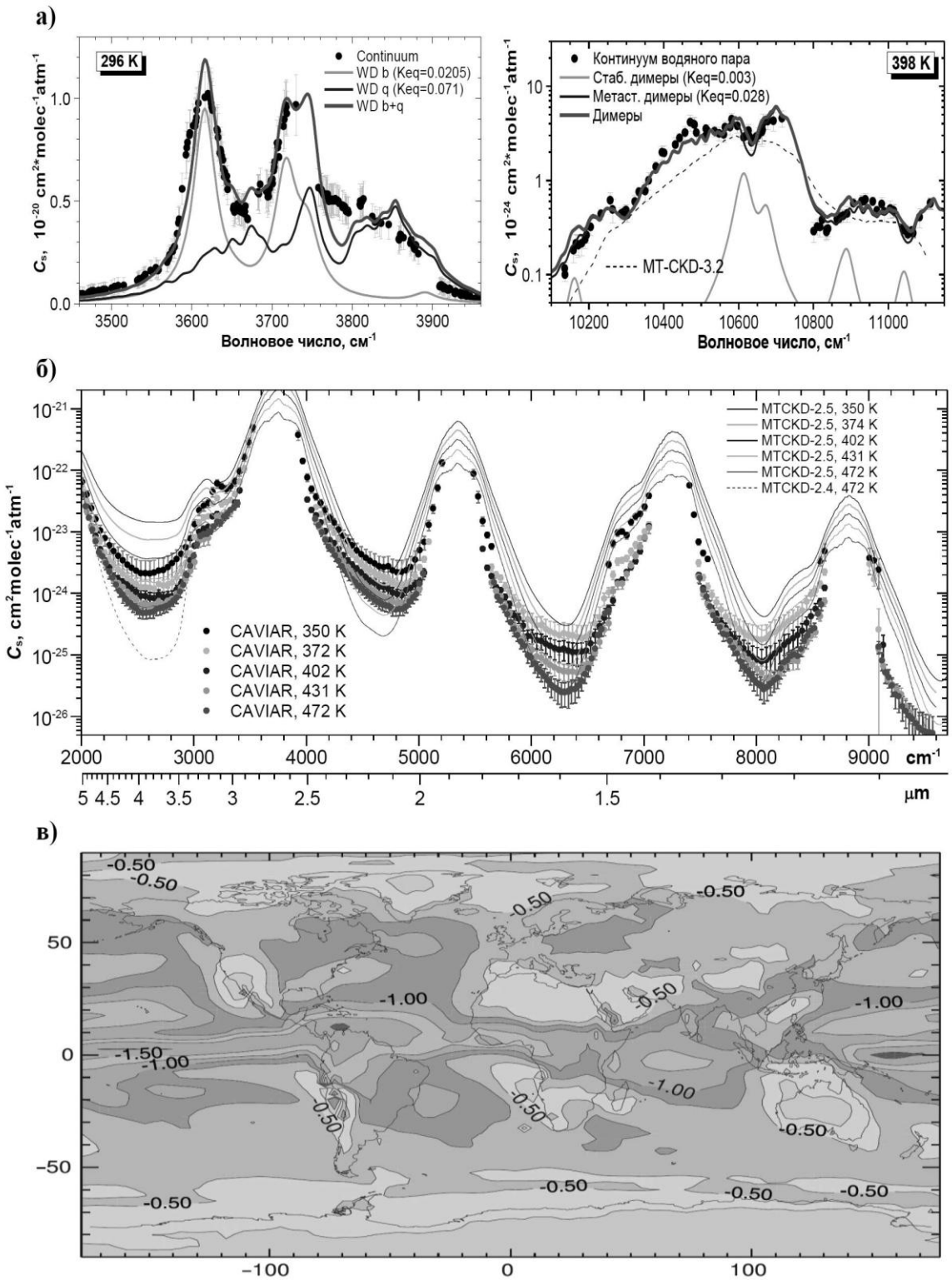



Рисунок. а) – примеры сравнения разработанной физической модели континуального поглощения водяного пара на основе димеров воды в разных полосах поглощения с экспериментом [4–5]; б) – результаты измерения континуума водяного пара в окнах прозрачности [6] в сравнении с моделью континуума MT_CKD; в) –оценка ожидаемого изменения среднегодового потока приземной солнечной радиации вследствие 33% увеличения содержания водяного пара для безоблачного неба после удвоения $CO_2$ по сравнению с оценкой на основе MT_CKD [7]

# ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИДАРОВ УПРУГОГО, КОМБИНАЦИОННОГО И ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

*И.А. Веселовский*

ФГБУН «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН», *г. Москва*
igorv@pic.troitsk.ru

Атмосферный аэрозоль является одним из ключевых факторов, определяющих радиационный баланс планеты. Аэрозоль воздействует на радиационный поток не только прямым образом, рассеивая и поглощая излучение, но и косвенно, посредством модификации свойств облаков. Различные типы аэрозолей значительно отличаются по своей способности воздействовать на формирование жидкой и кристаллической фазы облака, поэтому для исследования этих процессов необходимы технологии, позволяющие дистанционно получать информацию о высотном распределении состава аэрозоля. Для решения соответствующей задачи, технологии лидарного зондирования рассматриваются как наиболее перспективные

Цикл исследований проведенных в ИОФ РАН демонстрирует, что микрофизические параметры аэрозоля, могут быть оценены из измерений многоволнового лидара на основе NdYAG лазера с генератором гармоник. При этом регистрируются сигналы упругого рассеяния, а также сигналы колебательного и вращательного комбинационного рассеяния молекул азота. Полученные, таким образом, три коэффициента обратного рассеяния (355 нм, 532 нм, 1064 нм), два коэффициента экстинкции аэрозоля (355 нм, 532 нм) и три коэффициента деполяризации могут быть инвертированы в микрофизические параметры частиц, такие как эффективный радиус, объемная концентрация и комплексный показатель преломления. Для решения соответствующей обратной задачи предлагались различные методы, однако наибольшее распространение получил подход на основе метода регуляризации Тихонова [1], разработанный в ИОФ РАН [2].

Возможности аэрозольных лидаров могут быть расширены за счет использования эффекта лазерно – индуцированной флуоресценции частиц. Для выбранного спектрального диапазона, сечение флуоресценции, сильно зависит от типа аэрозоля, что в комбинации с многоволновыми измерениями делает возможной его идентификацию. Более того, поскольку, чистая вода практически не флуоресцирует, измерение флуоресценции облаков позволяет получить информацию об аэрозольных частицах в облачном слое.

Исследования флуоресценции проводились в период 2019–2022 гг. с использованием многоволнового лидара на основе Nd:YAG-лазера с генератором третьей гармоники. Приемная система содержала канал детектирования флуоресценции с шириной полосы пропускания 44 нм и центром полосы на длине волны 466 нм [3]. Проведенные исследования позволили определить сечения флуоресценции различных типов атмосферного аэрозоля, таких как пустынная пыль, континентальный аэрозоль, дым, растительная пыльца. Дым характеризуется наибольшим сечением рассеяния и его слои регистрировались на высотах до 14 км. Таким образом флуоресцентные измерения позволяют оценивать содержание частиц дыма в нижней стратосфере. Флуоресценция дыма так же надежно регистрировалась внутри перистых облаков, что позволило использовать данный подход для исследования процесса формирования кристаллов льда в дымовых шлейфах.

Для исследования процессов переноса аэрозоля в тропосфере, определение типа частиц и их концентрации должно проводиться с высоким временным и высотным разрешением. Наши исследования продемонстрировали, что совместное использование многоволновых и флуоресцентных лидарных измерений позволяет разделять основные типы аэрозоля в тропосфере с высотным разрешением около 50 м и временным разрешением 10 минут.

1. *A.N.Tikhonov and V.Y.Arsenin*, eds., *Solution of Ill-Posed Problems* (Wiley, New York, 1977).

2. *Veselovskii, I., A. Kolgotin, V. Griaznov, D. Müller, U. Wandinger, D. Whiteman*, Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding, Appl. Opt. 41, 3685–3699 (2002).

3. *Veselovskii, I., Hu, Q., Goloub, P., Podvin, T., Korenskiy, M., Pujol, O., Dubovik, O., Lopatin, A.*: Combined use of Mie-Raman and fluorescence lidar observations for improving aerosol characterization: feasibility experiment, Atm. Meas. Tech., 13, 6691–6701, 2020.

# ОТКЛИК ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ НА ЕСТЕСТВЕННЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С АНАЛИЗОМ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

*А.В. Елисеев*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», *г. Москва*

ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», *г. Москва*
eliseev.alexey.v@gmail.com

Анализ причин современных изменений климата и оценки будущих изменений состояния Земной системы возможны только при понимании климатических процессов и причинно-следственных связей между ними. В ИФА им. А.М. Обухова РАН и на кафедре физики атмосферы МГУ имени М.В. Ломоносова для этого используется модель Земной системы (МЗС) ИФА РАН – МГУ [1]. Это единственная российская модель, относящаяся к классу МЗС промежуточной сложности и участвующая в соответствующих международных сравнениях. Полученные с нею результаты включены, в частности, в Пятый и Шестой оценочные доклады МГЭИК. Модель содержит модули, описывающие атмосферу, океан, деятельный слой суши и криосферу, включая блоки процессов (в том числе, биогеохимических) в экосистемах [2, 3], химии атмосферы [4] и атмосферного электричества [5].

Модель реалистично воспроизводит доиндустриальное и современное состояние климатической системы, а также общее изменения климата последних нескольких столетий, в том числе наблюдавшиеся в XX веке [1]. Изменения характеристик состояния климата и экосистем в МЗС ИФА РАН–МГУ при различных сценариях внешнего воздействия на климат в XXI веке находятся внутри интервала, полученного по результатам с другими современными МЗС. В частности, впервые в мире было показано, что вклад естественных внешних воздействий (изменений солнечной постоянной и вулканических извержений) слабо влияет на климатический отклик в XX и XXI веках на фоне нарастающей антропогенной нагрузки на систему [6].

Вычислительная эффективность МЗС ИФА РАН–МГУ позволяет проводить вычисления на более длительные сроки по сравнению с моделями общей циркуляции. При этом, в частности, при задании немонотонного внешнего воздействия на систему возможен анализ степени обратимости происходящих климатических изменений с выделением гистерезисных эффектов. В частности, с МЗС ИФА РАН–МГУ впервые был выявлен эффект транзитивного гистерезиса площади распространения многолетнемёрзлых грунтов суши, связанный с медленным распространением теплового сигнала в богатой органикой почве (например, в торфяниках) [7].

Важным примером отклика на естественные внешние воздействия является изменение климата в голоцене. Транзитивные расчёты для голоцена были проведены впервые в России с МЗС ИФА РАН–МГУ [8]. При этом по расчетам для предыдущих 10 тыс. лет среднегодовая глобальная приповерхностная температура в последние десятилетия достигла уровня максимальных значений в период среднего голоцена (около 6 тыс. л.н.). Однако современные температурные режимы для отдельных регионов могут не достигать ещё уровня максимального потепления в среднем голоцене.

С использованием МЗС ИФА РАН–МГУ впервые в мире было показано, что известное по данным ледового бурения общее запаздывание содержания $CO_2$ в атмосфере

относительно температуры в ледниковых циклах не может служить аргументом против вклада антропогенного воздействия в современные изменения климата [9]. Запаздывание такого же знака воспроизводится моделью для первой половины XIX века – периода с малым антропогенным воздействием и сильными вулканическими извержениями (см. рис., левая панель). Однако при усилении антропогенного воздействия знак этого запаздывания меняется на обратный (рис., правая панель).


1. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // ДАН, 2012. № 443, (6). С. 732–736.

2. *Елисеев А.В.* Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2011. № 47, (2). С. 147–170.

3. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др.* Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008. № 44, (2). С. 147–162.

4. *Eliseev A.V., Gizatullin R.D., Timazhev A.V.* ChAP 1.0: A stationary tropospheric sulfur cycle for Earth system models of intermediate complexity // Geosci. Mod. Devel., 2021. № 14, (12). P. 7725–7747.

5. *Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В. и др.* Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // ДАН, 2019. № 485, (1). С. 76–82.

6. *Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В. и др.* Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке при различных сценариях солнечной и вулканической активности и антропогенных воздействий // Космические исследования, 2008. № 46, (4). С. 363–367.

7. *Eliseev A.V., Demchenko P.F., Arzhanov M.M., et al.* Transient hysteresis of near-surface permafrost response to external forcing // Clim. Dyn, 2014. № 42, (5–6). P. 1203–1215.

8. *Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В.* Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // ДАН, 2020. № 490, (1). С. 27–32.

9. *Muryshev K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I., et al.* Lead-lag relationships between global mean temperature and and the atmospheric $CO_2$ content in dependence of the type and time scale of the forcing // Glob. Planet. Change, 2017. № 148. P. 29–41.

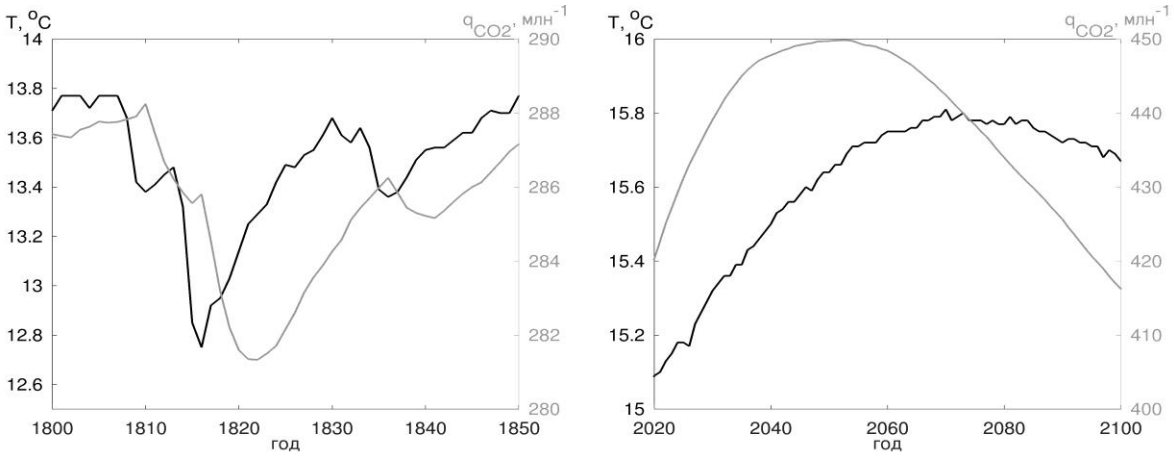



Рисунок. Временные сдвиги между глобальной приземной температурой и содержанием $CO_2$ в атмосфере в расчётах с МЗС ИФА РАН–МГУ для разных временных интервалов

# АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ

*С.Н. Куличков*

ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», *г. Москва*
snk@ifaran.ru

Фундаментальные знания о строении атмосферы, полученные за последние десятилетия в России и за рубежом указывают на существование в ней анизотропной турбулентности – долгоживущих и спорадически возникающих тонкослоистых структур с вертикальными масштабами от десятков метров до единиц километров; горизонтальные масштабы в десятки и сотни раз превышают вертикальные; имеющих значительные (на порядок превышающие средние) вертикальные градиенты температуры и ветра. Такие структуры заполняют весьма протяженные области высот и оказывают существенное влияние на: динамику атмосферы, генерируя непрогнозируемые течения; перенос примесей; распространение акустических, оптических и радиоволн.

Знания о статистических характеристиках, а также параметризация таких структур необходимы для совершенствования современных моделей климата.

Выявленная за последние десятилетия тонкослоистая структура на высотах верхней атмосферы (условно, 20÷130 км) исследуется в основном оптическими и радиофизическими методами. Эти методы достаточно хорошо методически проработаны, но имеют ряд физических ограничений. В них определяются лишь абсолютные значения температуры и ветра осредненные по области высот 100÷500 м за достаточно продолжительный интервал осреднения во времени. Толщины областей осреднения по вертикали сравнимы с вертикальными масштабами самих исследуемых тонкослоистых структур, что не позволяет корректно определять вертикальные градиенты измеряемых величин внутри и на границах слоев. Существенные ограничения радиофизических методов в области высот 30–60 км связаны также с недостаточной турбулизованностью атмосферы и незначительной электронной концентрации.

В этой связи нами, впервые, было предложено, теоретически проработано и экспериментально реализовано новое направление изучения атмосферы – дистанционное акустическое зондирование тонкой неоднородной структуры нижней и верхней атмосферы (высоты 0÷1км и 20÷130 км).

Впервые, обнаружено наличие в атмосфере и нижней ионосфере долгоживущих тонко-структурных слоистых неоднородностей температуры и ветра, характерных для всех времен года, для различных областей по Земному Шару и имеющих аномально большие, на порядок превышающие средние, значения вертикальных градиентов.

Разработанные методы основаны на, впервые нами исследованном, явлении частичного (френелевского) отражения акустических волн от тонкослоистых неоднородностей в нижней и верхней атмосфере [1]. Для зондирования нижней атмосферы использовались акустические волны от детонационного генератора. Зондирование верхних слоев атмосферы осуществлялось с использованием инфразвуковых волн от сотен наземных взрывов различной энергии и извержений вулканов на Камчатке и в Эквадоре.

В наших экспериментах получен уникальный архив данных, а также разработаны и реализованы современные численные и теоретические модели распространения звуковых и инфразвуковых сигналов от импульсных источников.

Принципиальным отличием предложенных нами акустических методов от традиционных является использование прямой взаимосвязи между характеристиками регистрируемого отраженного от тонких атмосферных неоднородностей сигнала и вертикальными градиентами температуры и ветра в этих слоях.

Указанное позволяет получить информацию о «мгновенных», а не осредненных, как в других методах, вертикальных профилях температуры и ветра. При этом, акустический метод не имеет ограничений для использования в наименее исследованной области на высотах 30÷60 км.

Для оценки параметров и вертикального распределения анизотропных структур температуры и ветра в атмосфере использовались акустические сигналы, зарегистрированные в области геометрической тени (области на земной поверхности куда не попадают из-за рефракции звуковые лучи от наземных источников).

Впервые, разработаны два новых метода зондирования атмосферы.

В первом методе нами предложен способ восстановления вертикального распределения анизотропных структур в верхней атмосфере на основе взаимосвязи спектров инфразвуковых сигналов, отраженных от анизотропных неоднородностей температуры и ветра и зарегистрированных на земной поверхности и спектров вертикального распределения самих этих неоднородностей.

Вторым методом был метод разложения (декомпозиции) регистрируемого продолжительного акустического сигнала на отдельные его составляющие в виде импульсов $N$ и $U$ – волн, соответствующих различным высотам частичного отражения от неоднородностей и приходящих в пункт наблюдений с различными интервалами времени (рис.).

Разработанные методы зондирования были протестированы с использованием впервые предложенного способа физического моделирования распространения звука, основанного на подобии (в отдельных случаях) вертикальных профилей эффективной скорости звука в атмосферном пограничном слое и в толще 0÷130 км [2].

Установлено наличие в области высот 45–50 км, как в районе Волгограда, так и в Эквадоре, изолированного слоя с аномально большими, в несколько раз превышающими среднее значение, величинами вертикального градиента эффективной скорости звука.

В результате были оценены параметры и построены вертикальные профили тонкой неоднородной структуры на высотах 0÷1 км; 20÷130 км.

Впервые установлено, что тонкая слоистая структура заполняет практически всю толщу атмосферы (по крайней мере, до высот 130 км) и является стабильной на протяжении значимых интервалов времени.

1. *Kulichkov S.N.* Long-range propagation and scattering of low-frequency sound pulses in the middle atmosphere// Meteorol. Atmos. Phys.2004. Vol.85.No.1–3. P.49–60.

2. *Куличков С.Н., Чунчузов И.П. и др.* «Физическое моделирование дальнего распространения инфразвука в атмосфере» Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2008.Т.44. № 2 . С. 186–198.

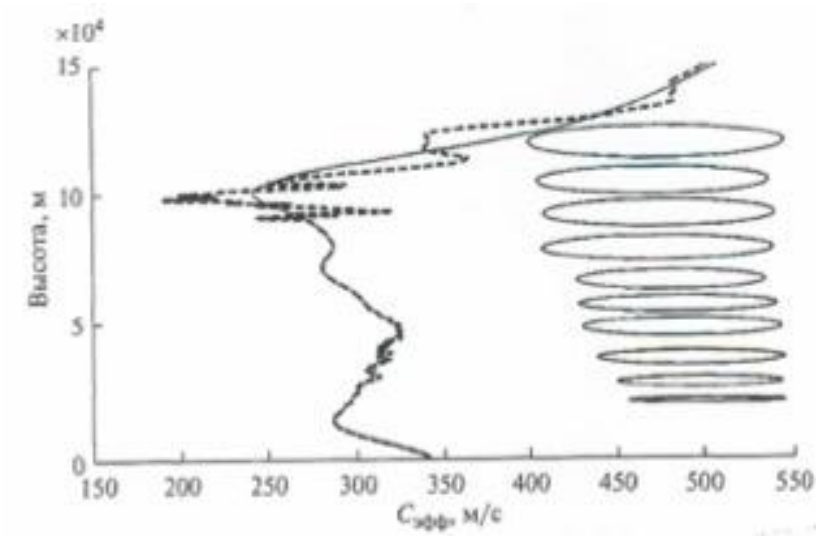



Рис. *Слева* – профиль эффективной скорости звука, полученный из модели G2S (жирная линия) с наложенной на него полученной нами тонко слоистой структуры; *справа* – схематическая модель тонкой анизотропной структуры атмосферы

# СОВРЕМЕННОЕ УСИЛЕНИЕ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА И ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА

*С.М. Семенов*

ФГБУ «Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля» *г. Москва*
SergeySememov1@yandex.ru

Интерес к парниковому эффекту вновь проявился во второй половине XX века в связи с его усилением вследствие обогащения атмосферы парниковыми газами в ходе развития мирового хозяйства. Несмотря на то, что парниковый эффект значительное время изучается в науках о Земле, при его определении, сравнительной оценке парниковой эффективности разных газов в наблюдаемом и ожидаемом потеплении, а также при интерпретации фактических данных, все еще остаются вопросы, в которые важно внести ясность. Ниже мы коснемся некоторых из них.

В последнем Глоссарии вклада Рабочей группы I (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport , 2021 г., с. AVII-28) в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) дается следующее определение/пояснение понятия «парниковый эффект» (перевод автора):

«Эффект инфракрасного излучения всех компонентов атмосферы, поглощающих инфракрасное излучение. Парниковые газы (ПГ), облака и некоторые аэрозоли поглощают земную радиацию, испускаемую поверхностью Земли и разными частями атмосферы. Эти вещества излучают инфракрасное излучение во всех направлениях, *но при прочих равных условиях чистое количество излучения, испускаемого в космос, обычно меньше, чем было бы испущено в отсутствие этих поглотителей* из-за понижения температуры с высотой в тропосфере и, как следствие, ослабления излучения. Рост концентрации ПГ увеличивает этот эффект; эту разницу иногда называют усиленным парниковым эффектом. Изменение концентрации ПГ из-за антропогенных выбросов способствует мгновенному радиационному воздействию. *Температура поверхности Земли и тропосфера нагреваются в ответ на это воздействие, постепенно восстанавливая радиационный баланс* в верхних слоях атмосферы».

Таким образом, парниковый эффект ассоциируется в этом определении/пояснении с дисбалансом приходящего к Земле и уходящего обратно в космос излучения, который затем компенсируется при восстановлении радиационного равновесия.

Однако анализ, проведенный с помощью концептуальной горизонтально-однородной радиационной модели системы ‘атмосфера+земная поверхность’, показал следующее. В состоянии радиационного равновесия (в частности, равенства потоков излучения, приходящего к земной атмосфере и уходящего в космос) восходящий вертикальный поток длинноволнового излучения быстрее возрастает при убывании высоты при обогащении атмосферы парниковыми газами. Следовательно, температура в приповерхностном слое увеличивается. Анализ равновесия в более полной горизонтально-однородной модели показал, что это состояние равновесия асимптотически устойчиво в предположении о гидростатичности.

**Таким образом, потепление в приповерхностном слое при обогащении атмосферы парниковыми газами проявляется и в состоянии радиационного равновесия, и связывать его именно с переходным процессом (когда наблюдается дисбаланс приходящей и уходящей энергии на верхней границе атмосферы) не следует.**

Далее, в современных прикладных научных исследованиях для целей сравнительного анализа парниковой эффективности различных парниковых газов и приведения их количеств к единой мере исходя из воздействия на климатическую систему, используются различные метрики (коэффициенты), например, GWP, GTP. Такие коэффициенты вычисляются исходя из радиационного воздействия (RF) или же изменений глобальной температуры в приповерхностном слое в ответ на выброс в атмосферу заданной массы парникового вещества. При этом для заданного периода времени эти коэффициенты считаются универсальными.

Однако такие ответные реакции климатической системы формируются нелинейными процессами, порождающими неаддитивность. **Это, в частности, означает, что сравнительная парниковая эффективность данного вещества может зависеть от совокупности исходных значений содержания в атмосфере всех рассматриваемых веществ, а также различаться для малых и больших возмущений**. В частности, модельные эксперименты для исходного состава атмосферы 1970 г. показали, что для малых возмущений (с использованием реакции радиационно-равновесной температуры $T$ на малое увеличение содержания газа $c$ в атмосфере, т.е. критерия $\Delta T/\Delta c$) парниковая эффективность трех ПГ выглядит так: $N_2O$ > $CH_4$ > $CO_2$. Однако для больших возмущений, при увеличении содержания газа в атмосфере на порядок, доминирует диоксид углерода: $CO_2$ > $CH_4$ > $N_2O$.

Последние десятилетия содержание этих парниковых газов в атмосфере в глобальном масштабе продолжает в целом расти, несмотря на международные усилия по ограничению антропогенных эмиссий. **Как показал анализ, для каждого из этих газов долговременные тренды содержания в атмосфере, судя по данным мониторинга глобальной сети станций, координируемой Всемирной метеорологической организацией (ВМО), сходны для подавляющего большинства станций. Более того, для $CO_2$ и $CH_4$ внутригодовая, межмесячная изменчивость на разных станциях обнаруживает большое корреляционное сходство, если учесть сезонные временные сдвиги**.

Сходство долговременных трендов связано с тем, что все три рассматриваемых газа являются «хорошо перемешиваемыми» (well-mixed) в атмосфере, поскольку время их жизни в атмосфере существенно больше времени перемешивания в ходе атмосферного переноса. Для $CO_2$ и $CH_4$ сходство внутригодовой, межмесячной изменчивости содержания в приповерхностном слое можно объяснить тем, что их мощные стоки в тропосфере активизируются сезонно, что проявляется в соответствующих временных сдвигах. Для $N_2O$ таких стоков в тропосфере нет, и существенного корреляционного сходства внутригодовой, межмесячной изменчивости содержания в атмосфере на разных станциях мониторинга также не наблюдается.

В заключение коснемся одного «противоречия», которое часто обсуждается в связи с ролью парниковых газов в наблюдаемом потеплении климата. Судя по палеоклиматическим данным и данным станционного мониторинга, при годовом и более долговременном осреднении содержание $N_2O$, $CH_4$ и $CO_2$ в атмосфере Земли монотонно возрастает по крайней мере с 1750 г. (условно – начало индустриальной эры). А средняя глобальная температура в приповерхностном слое, в целом возрастая, демонстрировала и периоды убывания! Однако это мнимое противоречие. Ведь то, что мы наблюдаем, есть суперпозиция, результат наложения процесса парникового потепления на естественные колебания. **На тех отрезках времени, где эти процессы одинаково направлены, эффект парникового потепления усиливается**. **На тех отрезках времени, где они разнонаправлены, эффект парникового потепления может временно ослабляться, компенсироваться и даже подавляться, т.е. будет наблюдаться временное похолодание.**

# ПРИМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ПЛАВ В ПРОГНОЗЕ ПОГОДЫ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

*М.А. Толстых*
ФГБУН «Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН»
ФГБУ «Гидрометцентр России», *г. Москва,*
m.tolstykh@inm.ras.ru

Глобальная модель атмосферы ПЛАВ [1, 2] разработана под руководством и при непосредственном участии автора в ИВМ им. Г.И.Марчука РАН и Гидрометцентре России. Модель ПЛАВ является основным численным методом глобального оперативного среднесрочного прогноза в Гидрометцентре России. Модель реализована, в том числе, на самом мощном в СНГ суперкомпьютере на процессорах архитектуры x86 – Cray XC40 (пиковая производительность 1,3 Пфлопс).

По мере развития модели ПЛАВ, изначально предназначенной для среднесрочного прогноза погоды, все большее внимание уделялось воспроизведению внутренней изменчивости атмосферы на различных временных масштабах, и в целом современного климата. Это позволило применить модель и для долгосрочного вероятностного ансамблевого прогноза погоды.

В последние годы с помощью модели ПЛАВ получен ряд результатов в этих областях. Так, модель воспроизводит квазидвухлетнее колебание в тропической стратосфере [3], что показано на рисунке внизу. Также воспроизводится и колебание Мэддена-Джулиана.

Достаточно успешное воспроизведение современного климата моделью ПЛАВ позволило разработать совместную модель атмосферы, океана и морского льда [4]. Показано, что совместная модель статистически значимо уменьшает ошибки воспроизведения атмосферной циркуляции в тропиках (по сравнению с моделью атмосферы, работающей совместно с моделью простой эволюции температуры поверхности океана) на сезонных временных масштабах. В настоящее время ведется настройка и усовершенствование данной модели.

В сотрудничестве с МГУ им М.В. Ломоносова и Центральной аэрологической обсерваторией при поддержке РНФ ведутся работы по включению модели озер и блока фотохимии озона. С помощью усовершенствованной модели будет выполнена проверка воспроизведения моделью ПЛАВ дальних связей в атмосфере.

Разработана и реализована ансамблевая система среднесрочного и субсезонного прогноза на основе модели ПЛАВ, учитывающая как неопределенности начальных данных, так и неопределенности прогностической модели

11 марта 2022 года ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» был отключен от выходной продукции Всемирного центра зональных прогнозов (Великобритания), необходимой для выпуска прогнозов погоды на эшелонах полета для гражданской авиации. В сжатые сроки в модели ПЛАВ и ее оперативной технологии были внедрены усовершенствования, необходимые для производства полной номенклатуры продукции, требуемой для выпуска авиационных прогнозов.

1. *Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю.* Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. Рец. д.ф-м.н. А.В.Старченко. М.: Триада лтд., 2017. 166 с. ISBN 978-5-9908623-3-3

2. *Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G.* Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core // Geosci. Model Dev., 2017. V. 10. P. 1961–1983, https://doi.org/10.5194/gmd-10-1961–2017

3. *Шашкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М.* Моделирование циркуляции стратосферы полулангранжевой моделью атмосферы ПЛАВ // Метеорология и Гидрология, 2019. №1. С. 5–21.

4. F*adeev R. Yu., Ushakov K.V., Tolstykh M.A., Ibrayev R.A.* Design and development of the SLAV-INMIO-CICE coupled model for seasonal prediction and climate research // Russ. J. Numer. An. Math. Mod., 2018. V. 33, № 6. P.333–340.

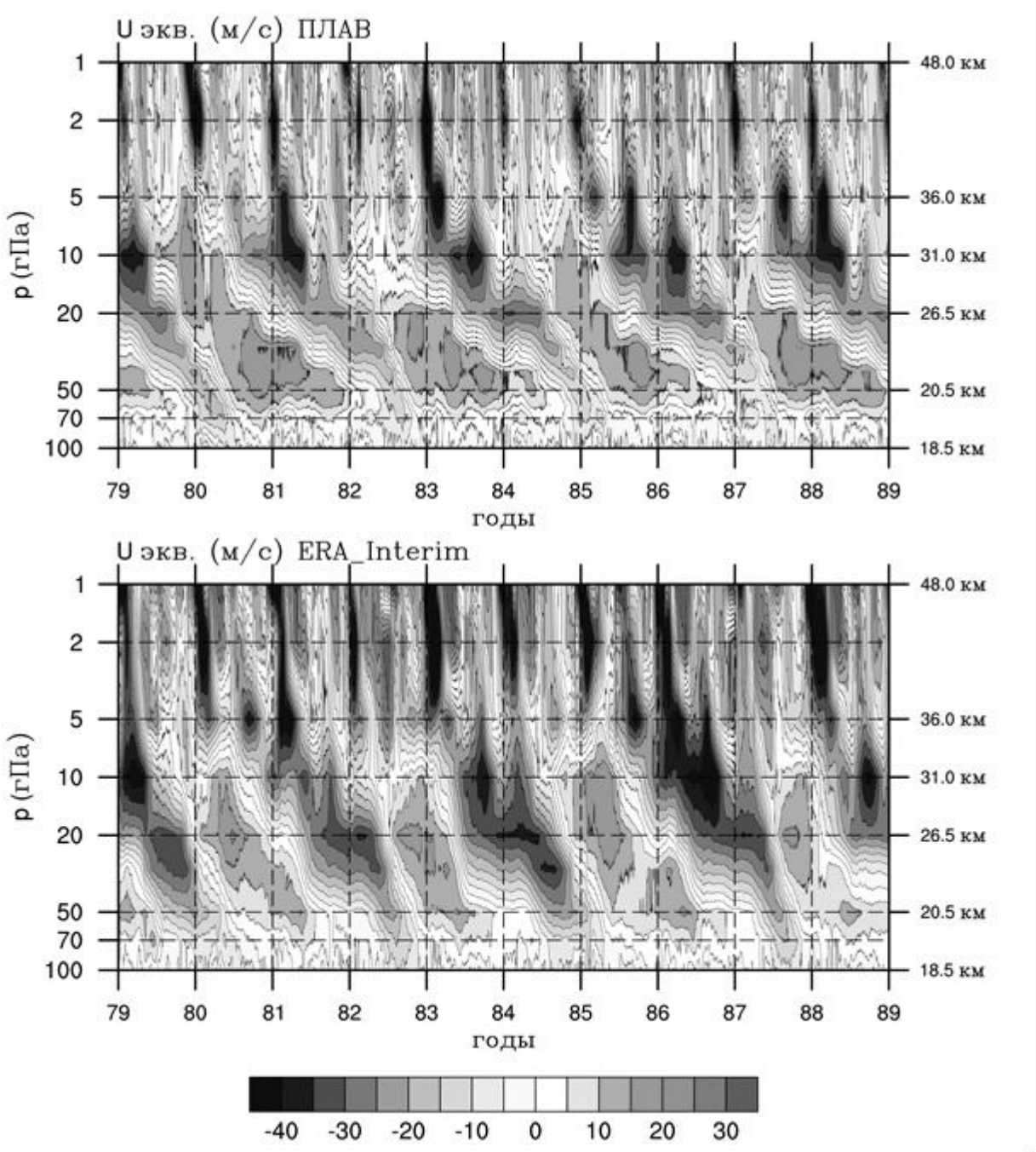



Рисунок. Квазидвухлетнне колебание в модели ПЛАВ (вверху) и в реанализе ERA-Interim (внизу)

# НЕЛИНЕЙНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА ЭВОЛЮЦИИ АТМОСФЕРНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.М. Фейгин*

ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики РАН», *г. Нижний Новгород*
feigin@ipfran.ru

В докладе обсуждаются новые подходы к исследованию механизмов эволюции сложных природных систем и результаты их применения к изучению и прогнозу протекания различных атмосферных фотохимических и климатических процессов. Под сложностью здесь понимается большое число переменных характеристик, определяющих состояние системы (высокая размерность), широкий спектр временных масштабов, с которыми эти характеристики эволюционируют (мультимасштабность) и нетривиальность (нелинейность) их пространственно-временных связей.

Излагаются разработанные автором методы, основанные на построении оптимальных математических моделей: максимально простых моделей, адекватных изучаемой сложной системе как с точки зрения воспроизведения имеющихся данных наблюдений о ее пространственно-временной изменчивости, так и при построении статистически значимого прогноза ее эволюции.

В случае систем, определяющих протекание фотохимических процессов в разных областях земной атмосферы, к настоящему времени созданы «полные» математические модели различных фотохимической системы (ФХС), в которые включены все известные на сегодняшний день химические составляющие атмосферы и протекающие между ними реакции (в том числе – реакции фотолиза) и учтены различные процессы переноса и разнообразные внешние воздействия. Такие модели по построению являются высокоразмерными, мультимасштабными и нелинейными, что чрезвычайно затрудняет (как правило, делает невозможным) выделение основных механизмов, обратных связей и внешних воздействий, определяющие наблюдаемую эволюцию системы, в том числе – отыскание условий проявления не наблюдавшихся ранее свойств системы. Ясно, однако, что при исследовании конкретного атмосферного феномена (например, антарктической озонной дыры или квазидвухсуточных осцилляций, регистрируемых в верхней мезосфере), такая полнота почти всегда является избыточной. Для этой ситуации разработан метод построения «базовых динамических моделей» (БДМ) [1–3]: математически корректно упрощенных моделей атмосферных ФХС, включающие минимально возможное число переменных и обладающие в интересующем диапазоне пространственно-временных масштабов теми же нелинейно-динамическими свойствами (НДС), что исходные полные модели.

С помощью данного метода исследованы нелинейно-динамические и фотохимические механизмы эволюции ряда атмосферных ФХС. В частности, показано, что динамика озонового слоя в зимне-весенний период в условиях Антарктиды является принципиально нелинейным неравновесным процессом как в «додырный» период (70-е годы и первая половина 80-х), так и в последующие годы, а «внезапность» возникновение и последующая изменчивость (год от года) озонной дыры объясняется изменением, вследствие роста содержания в атмосфере хлорфторкарбонов, значимости различных нелинейных механизмов, определяющих эволюцию соответствующей ФХС. Продемонстрировано, что вследствие нелинейности ожидаемое к середине XXI века исчезновение дыры может произойти на 15–20 лет позже [1, 3, 4].

Показано, что наряду с исследованием фундаментальных свойств АФС, БДМ являются эффективным инструментом для: (i) получения информации о не измеряемых характеристиках атмосферы; (ii) проверки корректности алгоритмов обработки данных измерений; (iii) оптимального планирования эксперимента. В частности, с помощью БДМ мезосферной ФХС: (i) продемонстрировано, что многолетние данные о распределениях O ниже 85 км и $HO_2$ выше 50 км, восстанавливаемые по данным спутниковых приборов SABER/TIMED и MLS/Aura, содержат существенные (до одного порядка) систематические ошибки и не пригодны для контроля энергетического баланса атмосферы на этих высотах [**5**]; (ii) найден критерий, позволяющий по данным измерений определять границу «области равновесия» ночного озона и показано, что положение этой границы является чувствительным индикатором изменения состояния верхней мезосферы – нижней термосферы [6]; (iii) впервые в результате обработки современных данных спутникового зондирования обнаружены предсказанные ранее [7] нелинейные двухсуточные фотохимические колебания в области мезопаузы [8].

Существенно иной является ситуация с построением математических моделей «из первых принципов», описывающих разномасштабные климатические процессы. Наиболее, по-видимому, сложные из используемых в настоящее время в естественных науках большие климатические модели в силу объективных причин не могут быть верифицированы во всем моделируемом диапазоне масштабов и для всех включенных в них процессов. Данное обстоятельство не дает, в частности, возможности оценить прогностическую способность этих моделей. В этих обстоятельствах автором был предложен подход к построению оптимальных прогностических моделей сложных природных (в том числе - климатических) систем, основанный на глобальной нелинейно-динамической реконструкции оператора эволюции исследуемой системы по данным измерений [9, 10].

С помощью данного подхода получен ряд значимых результатов, среди которых:

– Создание на основе анализа температуры поверхности океана с 1960 года по настоящее время эмпирической прогностической модели для прогноза в реальном времени явления Эль-Ниньо [11], которая была включена в ансамбль ведущих мировых моделей для прогноза Эль-Ниньо (IRI/CPC ENSO Predictions Plume, https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/ )

– Построение на основе временного ряда содержания изотопа $\delta^{18}O$ в донных отложениях продолжительностью 2,6 миллиона лет оптимальной эмпирической модели, включающей все главные факторы, которые могут влиять на климат Плейстоцена [12]. Показано, что средне плейстоценный переход (СПП) - изменение периодичности и формы циклов оледенения - обусловлен изменением внутренней нелинейной динамики климатической системы вследствие медленных климатических трендов и под действием быстропеременного «климатического шума». Продемонстрировано, что осцилляции орбитальных параметров не имеют отношения к СПП, влияя при этом на форму и продолжительность климатических циклов после СПП посредством захвата фазы циклов оледенения осцилляциями меридионального градиента инсоляции, обусловленных колебаниями наклонения земной оси.

1. *A.M.Feigin and I.B.Konovalov*. // JGR, 1996, n.D20, p.26,023-26,038.

2. *A.M.Feigin et al*. // JGR, 1998, n.D19, p.25,447-25,460.

3. *А.М.Фейгин*. // Известия РАН: Физика атмосферы и океана, 2002, 38, с.581-628

4. *I.B.Konovalov, A.M.Mukhina, and A.M.Feigin.* // JGR, 1999, v.104, n.D3, p.3,669-3,689.

5. *Kulikov, M.Yu., A.M. Feigin et al.* // JGR, 2018, doi:10.1002/2017JD026717.

6. *Kulikov, M.Yu., A.M. Feigin et al.* // GRL, 2019, https://doi.org/10.1029/2018GL080364

7. *G.Sonnemann and A.M.Feigin.* // Physical Review E, 1999, v.59, n.2-A, p.1719-1726

8. *Kulikov, M.Yu., A.M. Feigin et al.* // GRL, 2021. https://doi.org/10.1029/2021GL092795

9. *Фейгин А.М. и др.* // Известия ВУЗов – Радиофизика, 2001, №5-6, с.376-399

10. *Ya. I. Molkov, A.M. Feigin et al.* // Physical Review E, 2012, Vol. 85, n.3.

11. *Gavrilov, A., Feigin, A. et al.* // Climate Dynamics, 2019, 52(3–4), 2199–2216.

12. *Mukhin, D., Feigin A. et al.* // Nature Scientific Reports, 2019, doi.org/10.1038/s41598-019-43867-3

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

*О.Г. Чхетиани*

ФГБУ «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», *г. Москва*
lgg@ifaran.ru

Турбулентные движения поддерживаются каскадными процессами передачи энергии от крупных масштабов, включая движения общей циркуляции атмосферы, и сопровождаются формированием организованных структур, играющих важную роль в обменных процессах. Одной из характерных особенностей турбулентности на вращающихся объектах, в т.ч. и на Земле является наличие в ней спиральности – корреляции между полями скорости и завихренности – второй, наряду с энергией, сохраняющейся в отсутствии диссипации величиной и играющей немалую роль в явлениях самых разных масштабов [1, 2]. Измерения спиральности в естественных условиях были впервые выполнены в экспедициях ИФА им. А.М. Обухова РАН (2004, 2012, 2020–2021) с использованием оригинальных методик и аппаратуры [3, 4, 5] При этом воспроизводство спиральности в атмосферном пограничном слое (АПС) в немалой степени связано с конвективными процессами.

Конвекция в приповерхностном слое в аридных и полуаридных условиях, обеспечивает почти постоянный заметный вынос субмикронных фракций аэрозоля в атмосферу в условиях слабых ветров и в отсутствии сальтации [6,7,8]. Результаты экспедиционных измерений 2007-2021 гг. позволили впервые учесть этот фактор в атмосферных моделях с использованием поверхностной температуры почвы [9]. Существенны здесь также особенности рельефа и микрорельефа, электрические процессы.

В дальнейшем переносе аридного аэрозоля в свободную атмосферу большую роль играют мезомасштабная циркуляция в АПС [10], в развитии которой немалую роль играет фактор спиральности [11, 12, 13]. Подобные движения, на которые влияет уже конечная проводимость среды, и эффекты с ними связанные развиваются в верхней атмосфере и жидком ядре Земли.

Развитие циркуляционных систем в атмосфере может рассматриваться в рамках представлений об обратных каскадах энергии, имеющих место как в трехмерных [14], так и в квазидвумерных системах, наблюдаемых также в лабораторных гидродинамических экспериментах [15, 16]. Здесь оказывается важным наличие свойств спиральности в движениях, связанных зачастую с развитием бароклинных неустойчивостей [17, 18, 19]. В этом же контексте можно рассматривать эффективное использование вертикального потока спиральности как индекса общей циркуляции атмосферы [20] и в качестве прогностического фактора и индикатора возникновения полярных мезоциклонов [21].

1. *Чхетиани О.Г.* О третьих моментах в спиральной турбулентности // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т.63 (10). С. 768–772.

2. *Моисеев С.С., Чхетиани О.Г.* Спиральный скейлинг в турбулентности // ЖЭТФ 1996.Т.109 (6). С. 357–370.

3. *Копров Б.М., Копров В.М., Пономарев В.М., Чхетиани О.Г.* Измерение турбулентной спиральности и ее спектра в пограничном слое атмосферы // 2005. ДАН. Т.403 (5). С.627–630.

4. *Копров Б.М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г.* Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. №6. С. 637–647.

5. *Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V., Vazaeva N.V.* Turbulent Helicity in the Atmospheric Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorology. 2018. V. 168 Iss. 3 P. 361–385.

6. *Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г.* Конвективные потоки аэрозоля вблизи поверхности почвы // Доклады академии наук. 2009. Т. 426 (3). С. 380–385.

7. *Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A.* Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 5147–5162.

8. *Chkhetiani O., Gledzer E., Vazaeva N.* Measurements and Approximations for Submicron-Aerosol Size Distribution Functions // Earth and Space Science. 2021. V. 8. № 6. P. e2020.EA001616

9. *Chkhetiani O.G., Vazaeva N.V., Chernokulsky A.V., Shukurov K.A., Gubanova D.P., Artamonova M.S., Maksimenkov L.O., Kozlov F.A., Kuderina T.M.* Analysis of mineral aerosol in the surface layer over the Caspian lowland desert by the data of 12 summer field campaigns in 2002. 2020 // Atmosphere. 2021. V. 12(8). P. 985.

10. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О.* Организованная валиковая циркуляция и перенос минеральных аэрозолей в атмосферном пограничном слое // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 17–31.

11. *Пономарев В.М., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* Роль спиральности в формировании вторичных структур в экмановском пограничном слое // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39 (4) . С. 435–444.

12. *Пономарев В.М., Чхетиани О.Г., Шестакова Л.М.* Нелинейная динамика вторичных вихревых структур в пограничном слое атмосферы // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2007. № 4. С. 72–82.

13. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О., Шестакова Л.В.* Нелинейное развитие структур в экмановском слое // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. № 2. С. 197–211.

14. *Гледзер Е.Б. Чхетиани О.Г.* Обратный каскад энергии в развитой турбулентности при нарушении симметрии спиральных мод // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102(7). С. 521–529.

15. *Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* Влияние трехмерных структур на динамику турбулентности в тонких слоях жидкости в лабораторном эксперименте // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49 №2. С. 208–222.

16. *Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* Возникновение суб(супер)-ротации и струйных течений из мелкомасштабных квазидвумерных вихрей в лабораторных экспериментах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана 2017. Т. 53. № 6. С. 661–673

17. *Kalashnik M.V. Chkhetiani O.G.* An Analytical Approach to the Determination of Optimal Perturbations in the Eady Model. Journal of the Atmospheric Sciences. 2018. V. 75 Iss. 8 P. 2741–2761.

18. *Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V.* Discrete SQG models with two boundaries and baroclinic instability of jet flows // Physics of Fluids. 2021. V. 33(7), P. 076608.

19. *Калашник М.В., Курганский М.В., Чхетиани О.Г.* Бароклинная неустойчивость в геофизической гидродинамике // Успехи физических наук. 2022 (в печати)

20. *Курганский М.В., Максименков Л.О., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* Вертикальный поток спиральности как индекс общей циркуляции атмосферы // Доклады академии наук. 2018. Т. 479 № 4. С. 447–451.

21. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Дурнева Е.А.* О критериях идентификации полярных мезоциклонов // Метеорология и гидрология. 2022. (в печати).

# «ГЕОИНФОРМАТИКА»

## ГЕОИНФОРМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЛАНДШАФТНОЙ РАДИОЭКОЛОГИИ

*В.Г. Линник*
ФГБУ «Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского», *г. Москва*
linnik@geokhi.ru

Геоинформатика как наука о методах сбора, хранения, обработки и анализа географической информации ориентирована на получение новых знаний и решение географических задач в различных географических дисциплинах с использованием компьютерных технологий. Геоинформатика, как раздел информатики, исходит из физических представлений об иерархической многомасштабной организации ландшафтов, используя для моделирования физические модели, а также методы пространственного анализа.

Геоинформационные системы (ГИС), ориентированные вначале на автоматизацию картографирования, в дальнейшем стали использоваться для управления природными ресурсами в структуре систем поддержки принятия решений (СППР). Для этого ГИС стали интегрировать с системами математического моделирования [1].

Авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. открыла эпоху использования геоинформационного моделирования в радиоэкологии. На стыке радиоэкологии и ландшафтоведения сформировалось отдельное направление «ландшафтная радиоэкология», объектом исследования которой являются техногенные радионуклидные паттерны загрязнения и их трансформация в результате влияния комплекса геофизических и геохимических факторов [2]. Практическая направленность ландшафтно-радиоэкологических исследований связана с реабилитацией загрязненных радионуклидами территорий.

Ландшафтная радиоэкология рассматривается как теоретическая и практическая основа детерминированного и стохастического ГИС-моделирования биогенной и абиогенной миграции техногенных радионуклидов, а также других химических элементов.

Для информационного обеспечения ГИС-моделирования предложена и успешно реализована система ландшафтно-радиоэкологического мониторинга в Брянской области [2]. Ландшафтная модель территории служит системным интегратором отраслевых карт. Картографические слои ГИС включают факторы миграции техногенных радионуклидов, центральное место среди которых отводится цифровой модели рельефа (ЦМР). Информационное обеспечение моделей основано на результатах специальных исследований на стационарных ландшафтно-радиационных полигонах, для которых построены ЦМР по топографическим планам масштаба 1:200 с сечением горизонталей 20 см.

Полигоны – это полевые лаборатории для получения массовых статистических данных методами неразрушающего контроля на микроландшафтном уровне для идентификации и верификации параметров ландшафтно-радиоэкологических моделей.

Анализ распределения Cs-137 в почвах на полигонах выявил сложную мультимасштабную структуру паттернов радионуклидного загрязнения на микроландшафтном уровне [2].

Классическое ландшафтоведение построено на детерминированных принципах взаимодействия основных ландшафтообразующих факторов. Иной подход представлен у П. Барроу [1], предложившего рассматривать структуру и динамику ландшафта на основе единства детерминированных и стохастических взаимосвязей между компонентами природы.

Концепция однородности элементарных ландшафтных единиц, принятая в классическом ландшафтоведении, дополняется представлениями об их гетерогенности, как фундаментальном свойстве ландшафтной организации.

На микроландшафтном уровне выявлено чередование структур, различающихся разной степенью пространственной коррелированности в зависимости от шага опробования. Влияние микрорельефа, главного фактора структурирования паттернов Cs-137, нелинейно в пределах выделенных фаций. Пространственная корреляция на микроландшафтном уровне может рассматриваться как индикатор стохастической самоорганизации ландшафтных структур [3].

Анализ ландшафтной дифференциации Cs-137 на локальном уровне показал, что в элювиальных ландшафтах его пространственная корреляция минимальна и возрастает в трансэлювиально-аккумулятивной позиции. В поймах рек распределение Cs-137 контролируется ландшафтно-гидрологическими условиями осаждения радионуклидов как детерминированной, так и стохастической природы [2].

Результаты моделирования трансформации паттернов Cs-137 при эрозионных процессах и гидрологическом стоке в бассейне р.Костица выявили зоны конвергенции/дивергенции латеральных потоков, для которых характерны нелинейные зависимости распределения Cs-137 от геоморфометрических параметров.

Разработаны методы геоинформационного моделирования загрязнения Cs-137 сельскохозяйственной продукции в Брянской области [4]. Реализована прогностическая система ГИС-моделирования загрязнения Cs-137 сена и молока для хозяйств Новозыбковского и Клинцовского районов Брянской области на временном интервале 1987-2005 годов. В системе реализовано два режима моделирования: детерминированный и стохастический [4]. Стохастическое моделирование позволяет оценить радиоэкологический риск загрязнения сельскохозяйственной продукции.

Организован геоинформационный радиоэкологический кадастр (СППР РадГИС «Енисей») долины р.Енисей [4] для оценки радиационного воздействия на окружающую среду и население. Радионуклидное загрязнение поймы р.Енисей определяется высотным положением, литологическим составом пород, а также длительностью затопления. На участке поймы ГХК-Стрелка площадью 99,2 км$^2$ депонировано 160 Ки Cs-137, что составило 30,5% от сбросов ГХК за период 1976-2000 гг. Средствами СППР выполнена реконструкция радиационной обстановки на о. Атамановский на 1966 г. – период экстремального загрязнения долины р.Енисей [2].

1. *Burrough P.A., McDonnel R.* Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press UK; 2 edition. 1998. 356 p.

2. *Линник В.Г.* Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов. М.: РАН. 2018. 372 с.

3. *Linnik V.G., Saveliev A.A., Sokolov A.V.* Transformation of the Chernobyl $^{137}Cs$ Contamination Patterns at the Microlandscape Level as an Indicator of Stochastic Landscape Organization. In: Khoroshev A., Dyakonov K. (eds) Landscape Patterns in a Range of Spatio-Temporal Scales. Landscape Series, vol. 26. Springer, Cham. 2020. P.77–89.

4. *Linnik V.G., Ivanitsky O.M., Sokolov A.V.* GIS in Radioecology: History and Prospects of Data Processing In: Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences. Special Publication commemorating the 75th Anniversary of the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences Springer; 2022. P. 1–46. (forthcoming)

# РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

*Лупян Е.А.*

ФГБУ «Институт космических исследований РАН», *г. Москва*
evgeny@smis.iki.rssi.ru

Доклад посвящен вопросам развития методов, подходов и технологий построения современных геоинформационных систем, ориентированных на использование данных спутниковых наблюдений, для решения задач дистанционного мониторинга различных процессов и явлений [1].

В докладе представлены основные особенности и возможности методов, подходов и технологий создания информационных систем дистанционного мониторинга, разработанных в Институте космических исследований РАН, и опыт их использования для создания различных научных и прикладных геоинформационных систем дистанционного мониторинга. Кратко представлены особенности и возможности некоторых из таких научных и прикладных систем. В том числе:

- Геоинформационная система See The Sea (SeeTheSea) (http://ocean.smislab.ru/), ориентированной на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана.
- Геоинформационная система «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView) (http://volcanoes.smislab.ru/), основной задачей которой является обеспечение специалистов-вулканологов оперативными спутниковыми данными и различными информационными продуктами, получаемыми на основе их обработки, для мониторинга и изучения вулканической активности Камчатки и Курил.
- Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации (ИСДМ-Рослесхоз) (https://aviales.ru), ориентированной на обеспечение мониторинга природных, и, первую очередь лесных, пожаров на всей территории страны.
- и др.

Особое внимание в докладе уделяется вопросом создания Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (ЦКП «ИКИ-Мониторинг», http://ckp.geosmis.ru) [2] и входящей в его состав уникальной научной установки (УНУ) информационной систем Вега-Science (УНУ Вега-Science http://sci-vega.ru/) [3]. В докладе представлены как основные возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг», так и опыт его использования для решения различных научных и прикладных задач. ЦКП «ИКИ-Мониторинг» является единственной подобного класса геоинформационной системы локализованной на территории РФ, обеспечивающей научным коллективам, ведущим работы в области исследования окружающей среды, природных ресурсов и различных антропогенных объектов к долговременными (около 40 лет) постоянно обновляющимся архивами различных спутниковых данных (более 30 систем спутниковых наблюдений) и результатов их обработки. Особо следует отметить, что ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и ИС Вега-Science не только обеспечивают возможность получения спутниковых данных

и результатов их анализа, но и предоставляет web-инструменты и вычислительные ресурсы для их распределенной обработки и дальнейшего анализа. Возможностями системы сегодня пользуются более 100 российских и зарубежных организаций, с ее помощью в последние годы выполнено более 70 научных проектов, по результатам которых опубликовано более 600 научных работ.

1. *Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Кобец Д.А.* Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.

2. *Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

3. *Loupian E.A., Bourtsev M.A., Proshin A.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Radchenko M.V., Tolpin V.A., Uvarov I.A.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. №. 1. P. 77. DOI: doi.org/10.3390/rs14010077.

# О РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО, КАРТОГРАФИЧЕСКОГО И ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

*И.Н. Розенберг*

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» *г. Москва*
i.rozenberg@geosc.ru

В докладе указаны основные параметры российских железных дорог и сформулированы цели создания и внедрения интеллектуальных систем управления железнодорожным транспортом.

Отмечено, что разветвленная структура сети железных дорог России функционирует в пространстве и во времени на большой территории, в различных природно-климатических условиях, испытывая потребности в картографическом, навигационно-информационном, геодезическом и географическом обеспечении. Остро стоят проблемы ситуационной осведомленности, интероперабельности пространственных данных, визуального подхода к представлению знаний для формирования единого когнитивного пространства с целью принятия обоснованных управленческих решений. Эти проблемы в системах управления российскими железными дорогами решены за счет созданного отечественного картографического и геоинформационного обеспечения.

Для успешного результата пришлось интегрировать новейшие научные достижения в области математики, географии, картографии и информатики, что и стало основой геоинформационного обеспечения железнодорожной отрасли.

В результате фундаментальных исследований при создании геоинформационного обеспечения интеллектуальных систем управления были получены следующие основные результаты:

- методология представления знаний и их автоматического извлечения из больших объемов данных, непрерывно накапливаемых в ГИС из разных источников. Здесь были решены важнейшие задачи согласованности и семантической точности геоданных;
- обеспечена интероперабельность геоданных;
- создана методология применения сетецентрических подходов, платформенно-иерархических и когнитивных моделей с целью оптимального преставления знаний, распознавания и сопоставления геоинформационных образов понятий и ситуаций. Решены оптимизационные задачи связанные с избыточностью картографической и семантической информации, выделением рациональной рабочей области аналитика.
- методология построения динамических геоинформационных моделей, отражающих изменчивость свойств транспортных систем при неполной и частично неопределенной информации.

Для этого выполнены исследования в области теории графов, в результате созданы модели и методы решения многокритериальных оптимизационных задач на нечетких темпоральных графах и гиперграфах. Разработаны методы и алгоритмы анализа потоков в сетях с нечеткими параметрами, с использованием показателя живучести сети. Данное свойство критически важно для анализа инфраструктуры транспортных систем, компоненты которых подвержены повреждением и отказам [1].

В докладе приведены примеры практического применения результатов фундаментальных исследований и прикладных разработок.

Создано единое координатно-временное пространство вдоль сети железных дорог путем реализации высокоточной координатной системы (ВКС) и опорной геодезической сети. Это позволило обеспечить географическое позиционирование всех объектов транспортной отрасли в единой координатной системе.

В единую систему были интегрированы различные данные: космической съёмки с отечественных и зарубежных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); данные с подвижных путеизмерительных и диагностических комплексов; мобильных георадарных комплексов и средств наземного и воздушного лазерного сканирования; оперативных данных с беспилотных авиационных систем.

Такой подход по-новому изменил сам принцип работы с географической пространственной информацией. Традиционная «карта» уступила место «базе пространственных данных» (БПД) в качестве исходного понятия и источника географических сведений для построения геоподосновы функционирования железнодорожного транспорта [2].

АО «НИИАС» совместно с ИКИ РАН был создан специализированный геоинформационный портал ГИС РЖД-SAT, обеспечивающий оперативный доступ потребителей к геопространстенной информации, полученной средствами ДЗЗ.

Примером эффективного использования геоинформационных ресурсов является организация постоянного оперативного контроля за состоянием и использованием земельно-имущественного комплекса ОАО «РЖД» содержащего сотни тысяч объектов.

Разработанные технологии также позволяют строить различные многомерные цифровые расчетные модели и создавать сервисы мониторинга природно-техногенных процессов, там, где есть высокий риск опасного воздействия на объекты железнодорожной инфраструктуры.

Показано, как на базе материалов дистанционного зондирования Земли, баз пространственных данных и цифровых технологий их обработки, была реализована технологическая схема работ по контролю за наиболее неблагоприятными природно-техногенными явлениями, включая экзогенные геологические процессы, в том числе: обвалы, сели, просадки, карст, овражную и склоновую эрозию, абразию морских берегов, комплексы криогенных процессов на территориях с вечной мерзлотой, заболачивание и другие природные процессы, воздействующие на объекты железнодорожной инфраструктуры.

Представленные выше геоинформационные технологии реализованы в целевой архитектуре ГИС РЖД, которая обеспечивает полную ситуационную осведомленность диспетчерского аппарата соответствующих хозяйств и служб ОАО «РЖД»; реализацию объектно-ориентированных моделей и эффективных алгоритмов поддержки принятия решений по управлению технологическими процессами в режиме реального времени [3].

1. *Розенберг И.Н., Беляков С.Л., Боженюк А.В., Герасименко Е.М., Глушков А.А., Косенко О.В., Савельева М.Н.* Методы и алгоритмы создания интеллектуальных геоинформационных систем для управления транспортными процессами. – М.: ВИНИТИ РАН, 2019 – 292 с.

2. Дулин *С.К., Розенберг И.Н., Уманский В.И.* О проблеме интеграции информационных ресурсов // Сборник трудов ИПИ РАН «Системы и средства информатики». Том 29, №3, 2019. с.127–138.

3. *Розенберг И.Н.* Современные подходы к использованию ГИС в задачах цифровизации железнодорожного транспорта // Научная сессия Общего собрания членов РАН 13–14 ноября 2018 г. М.: Российская академия наук, 2019. С. 248–255

# ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ КАК КОМПОНЕНТЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ РФ

*В.С.Тикунов*

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова», *г. Москва*
vstikunov@yandex.ru

*Геоинформатика* – в трех своих ипостасях как наука, технология, производство, изучает теорию, методы и способы накопления, обработки и передачи данных, информации и знаний. Теорию геоинформатики представляют основные положения о формах, методах связи между явлениями и процессами их представлением в виде цифровых моделей [1]. Геоиформатика как набор методов исследования хорошо подходит для комплексного анализа и адаптации *целей устойчивого развития*, которые разрабатываются для мира и всех стран, включая Россию, сформирован набор из 17 взаимосвязанных целей и 169 соответствующих задач, названых в резолюции Генассамблеи ООН «Повесткой дня на период до 2030» года. Основными блоками верхнего уровня принято считать социально-демографический, экономический и экологический. Для характеристики каждого из этих блоков нет единого рекомендованного набора исходных показателей-индикаторов. Нами для этих целей разработана схема многоуровневой комплексной оценки устойчивости развития на основе групповых индексов. Оценка устойчивости развития регионов проводится по следующим десяти темам: здоровье населения, безработица, доходы населения, инвестиционная привлекательность, уровень производства, производственный потенциал, уровень загрязнения воздуха, уровень загрязнения воды, производственная и антропогенная нагрузка на окружающую среду. Разработанная нами методика может применяться как стандартная система оценки для внутрирегиональных, межрегиональных и межстрановых сопоставлений, информирования общественности об уровне развития экономики, социальной сферы, качестве окружающей среды и эффективности проводимой региональной политики.

В качестве конкретного и одного из самых сложных примеров возьмем первую тему – общая характеристика здоровья населения. Её цель – охарактеризовать возможность продолжительной здоровой жизни населения (*общественное здоровье*). Общественное здоровье отражает как индивидуальные особенности людей, так и способность всей общности осуществлять свои социальные, экономические и природоохранные задачи. Потери общественного здоровья приводят к очень большим экономическим потерям, выражающихся в заболеваемости, инвалидности, смертности. Можно с полной уверенностью утверждать, что уровень здоровья населения служит достаточно точным и бескомпромиссным отражением качества жизни, для характеристики которого применяются десятки показателей (естественно все они в какой-то степени связаны с качеством жизни, но вместе становятся просто сложно анализируемыми, зачастую элиминирующими друг друга). Их анализ, проведенный нами вместе с Б.Б.Прохоровым, позволил сделать выбор всего 3 показателей, надежно представляющих общественное здоровье: ожидаемая продолжительность жизни мужчин и женщин, а также младенческая смертность.

Создана база данных с взаимоувязанными слоями от глобального до муниципального уровня для взрослого населения (мужчины и женщины); подростки и дети; жители городов и сёл. Для конкретизации целей можно обратиться к анализу нескольких аспектов – причин заболевания, эффективности лечения, характера проявлений болезни, в том числе *злокачественных новообразований*, занимающих 2-е место в структуре смертности; двухкратое превышение смертности среди мужчин по

сравнению с женщинами и др. особенности. В этом случае требуется формирование специализированных баз данных, методов моделирования и описания процессов их образования и развития, эффективности борьбы с ними. Средства комплексных характеристик описывающих формирование новообразования это, как правило, не один фактор, а формирование их комплекса, который анализировался нами совместно со специалистами-онкологами Онкоцентра им. Н.Н.Блохина, на примерах нозологических форм рака желудка, рака легкого, рака молочной железы, колоректального рака и меланомы кожи – одних из самых распространенных локализаций. Для анализа стандартизованных показателей смертности и заболеваемости населения злокачественными новообразованиями разработаны алгоритмы многомерных классификаций, прежде всего «нечетких».

Для *визуализации* исходных данных и результатов моделирования применялись как стандартные картографические приемы, так и бесступенчатые шкалы, удобные для их применения в геоинформационных системах. Показано преимущество использования линейных, площадных и объемных анаморфоз для одновременной визуализации как абсолютных так и относительных показателей, например, показывая площади регионов на анаморфозе пропорциональными суммарному объёму выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от автомобильного транспорта и стационарных источников, а в качестве тематической нагрузки выбрав интегральный индекс антропогенного воздействия на атмосферный воздух. Для визуализации пропорционального соотношения загрязнения атмосферы, гидросферы и литосферы в интегральном индексе построена серия анаморфоз в методике цветового треугольника (RGB), где каждому показателю соответствует свой цвет: твердым бытовым отходам – красный, выбросам загрязняющих веществ в атмосферу – зеленый, а сбросу загрязненных сточных вод — синий. Одинаковому уровню развития по всем трем компонентам соответствует смешение равных долей этих трех цветов – серый. Проделанные блоки исследования позволят сформировать основу экспертной системы и дадут возможность сравнивать планы и методики лечения ряда заболеваний и индивидуализируют их.

Для более динамичного учета изменений или появления совершенно новых, прежде всего, междисциплинарных направлений, по нашей инициативе, предложено сформировать и опробовать механизм работы *распределенного геоинформационного научного центра*, что и было сделано за один истекший год. Отметим, что создание таких центров не требует дополнительного финансирования и площадей, поскольку в их деятельности могут принимать участие ученые из разных академических институтов и вузов, заинтересованных в данной тематике и использующих свое оборудование. Небольшое финансирование может обеспечить грантовая поддержка. Выполнив исследование по данной тематике объединенными научными силами, такие структуры легко могут быть трансформированы и под другую задачу, актуальную к данному времени. Что касается деятельности распределенного геоинформационного научного центра, была организована работа по изучению пространственно-временных аспектов пандемии КОВИД-19 и сданы в печать 3 статьи. Этот блок работы осуществлен совместно с сотрудниками Института географии РАН. Арсенал перспективных средств геомоделирования на 50 страницах будет опубликован в сборнике ИнтерКарто/ИнтерГИС текущего года. Членство в редколлегиях ведущих геоинформационных журналов способствует также получению самых последних разработок и публикации своих статей.

1. *Капралов Е.Г. и др.* Геоинформатика. В 2-х кн. Учебн. для вузов. Под ред. В.С.Тикунова. 3-е изд., перер. и доп. М.: Академия, 2010. Кн. 1, 400 с., с цв. ил.; Кн. 2, 432 с.

Научное издание

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУК О ЗЕМЛЕ

Тезисы Всероссийской научной конференции
г. Москва, 12–14 апреля 2022 г.

Формат 60×88 1/8
Гарнитура Times
Усл.-п. л. 40,4. Уч.-изд.л. 19,6
Тираж 200 экз.

Издатель – Российская академия наук

Публикуется в авторской редакции

Издается по распоряжению президиума РАН
От 21.02.2022 г. № 13000-166
и распространяется бесплатно