

Проблема цунами: вчера, сегодня, завтра

Б. В. Левин¹

Получено 30 сентября 2010; опубликовано 17 октября 2010.

Тектонические землетрясения возникают в результате разрушения локализованного объема среды и внезапного высвобождения упругой энергии, накопленной в земных недрах, в результате геодинамического деформирования. Сброс накопленного напряжения приводит к образованию сейсмических разрывов и множественных микроразрушений в среде. Современные исследователи связывают процесс накопления напряжений в породах как с внутренними (эндогенными) явлениями, так и с внешними (экзогенными), периодическими процессами. Помешать развитию подобных процессов человечество пока явно неспособно. В их числе цунами, которые представляют собой длинные гравитационные волны в обширном водоеме, возникающие как отклик водного слоя на сильное подводное землетрясение или на мощное возмущение поверхности воды от иного источника. Высота наката волны способна преодолеть отметку 30 метров, а дальность заплеска нередко превышает 2–3 км. Служба предупреждения о цунами, которая уже много лет функционирует в Тихоокеанском регионе, сегодня базируется в основном на оперативной сейсмической информации, получаемой от сейсмологов, но эффективность этой службы нельзя пока считать удовлетворительной и она требует дальнейшего усовершенствования, в частности, необходимости тщательного изучения сильных геофизических явлений для проникновения в суть физических механизмов земных процессов. В статье обсуждаются проблемы, интересовавшие сейсмологов и цунамистов 20 лет назад; состояние проблемы цунами сегодня и перспективы исследования волн цунами и снижении риска через 20 лет. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Цунами, палеоцунами, спутниковая регистрации цунами, высокоэнергетические процессы в океане.

Ссылка: Левин, Б. В. (2010), Проблема цунами: вчера, сегодня, завтра, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ10002, doi:10.2205/2010NZ000055.

1. Введение

Человеческое сообщество и, в частности, ученые, политики, чиновники, журналисты, должны отдавать себе отчет в неизбежности существования природных процессов и природных катаклизмов, на фоне которых развивается наша цивилизация. Весьма популярный сегодня термин “природные катастрофы” отражает уровень нашего недостаточного понимания механизмов возникновения высокоэнергетических природных процессов. Когда мы научимся понимать физику природных процессов и прогнозировать их появление, тогда они перестанут считаться катастрофическими явлениями. Однако процесс обучения пока еще далек от завершения.

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

“При полном незнании земли своей утвердилась у всех гордая уверенность, будто знают ее”. Такими словами Н. В. Гоголь охарактеризовал в письме от 20 октября 1849 года свое понимание ситуации, которая за последние 150 лет изменилась довольно слабо.

Мы прекрасно понимаем, что столкновение с Землей метеорита диаметром в 1 км приведет к небывалой катастрофе, и воспрепятствовать такому событию нам пока еще трудно. Хорошо, что подобные явления должны, вероятно, происходить не чаще, чем раз в 100000 лет.

Тектонические землетрясения, согласно современным воззрениям, возникают в результате разрушения локализованного объема среды и внезапного высвобождения упругой энергии, накопленной в земных недрах, в результате геодинамического деформирования. Сброс накопленного напряжения приводит к образованию сейсмических разрывов и множественных микроразрушений в среде. Современные исследователи связывают процесс накопления напряжений в породах как с внутренними (эндогенными) явлениями, так и с внешними (экзогенными) периодическими процессами. В качестве послед-

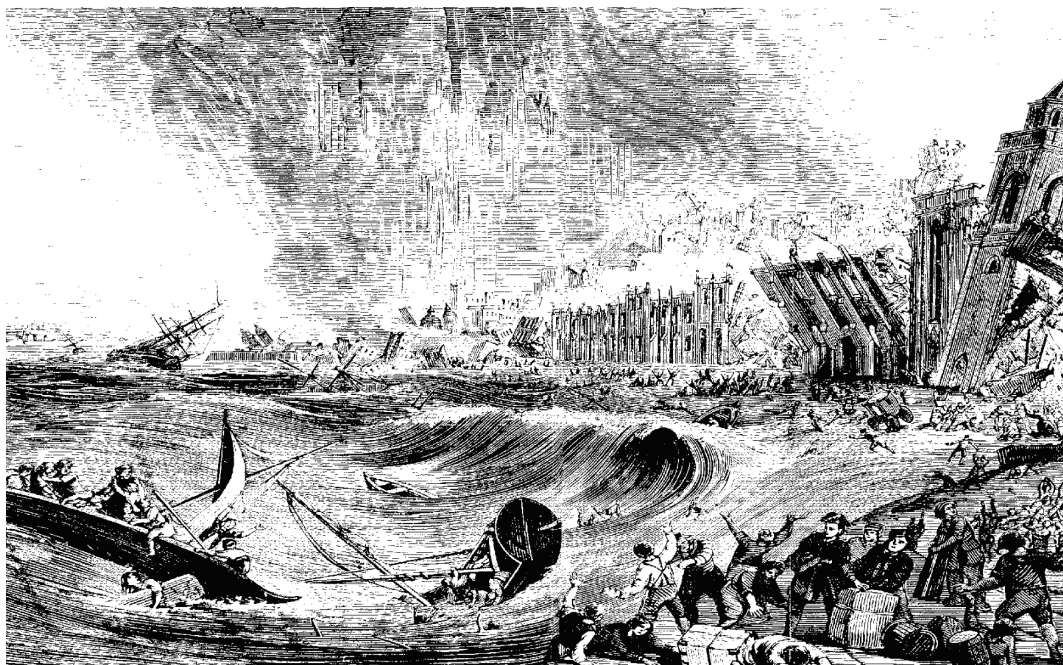


Рис. 1. Лиссабонское землетрясение и цунами 1755 г. Старинная гравюра неизвестного автора.

них рассматриваются, например, приливные воздействия Солнца и Луны на Землю. Помешать развитию подобных процессов человечество пока явно неспособно.

Цунами представляют собой длинные гравитационные волны в обширном водоеме, которые возникают как отклик водного слоя на сильное подводное землетрясение или на мощное возмущение поверхности воды от иного источника (метеорита, взрыва, вулканического извержения, оползня). Линейный размер источника цунами может достигать 100 и даже 1000 км, в то время как амплитуда волны вблизи источника и в открытом океане не превышает одного или нескольких метров. Длина волны цунами в океане составляет сотни километров, период волны может превышать 30 и даже 40 минут, а к берегу приходит целый пакет волн. Скорость распространения волны цунами в океане в среднем составляет примерно 720 км/час, а при набегании волн на побережье их скорость может снижаться до 70 км/час. Длина фронта волны, поражающей берег, может достигать 10 км и более. Представьте себе тысячу скорых поездов, вылетевших одновременно из океана и ударивших сразу по всей линии берега (Рис. 1).

Высота наката волны способна преодолеть отметку 30 метров, а дальность заплеска нередко превышает 2–3 км. Служба предупреждения о цунами, которая уже много лет функционирует в Тихоокеанском регионе, сегодня базируется в основном на оперативной сейсмической информации, получаемой от сейсмологов, но эффективность этой службы нельзя пока считать удовлетворительной, и она требует дальнейшего усовершенствования.

Приведенные аргументы убеждают нас в необходимости тщательного изучения сильных геофизических явлений для проникновения в суть физических механизмов земных процессов.

2. Какие проблемы интересовали сейсмологов и цунамистов 20 лет назад

Советская школа исследователей цунами, организатором и признанным лидером которой был академик С. Л. Соловьев (1930–1994 гг.), прочно занимала передовые позиции в мировом научном сообществе в течение всей второй половины XX века. Проблема цунами, содержащая достаточно много неразгаданных тайн, вызывала интерес среди механиков, физиков, математиков, геофизиков, океанологов, и привлекала таких известных ученых как М. А. Лаврентьев, А. С. Алексеев, Н. В. Зволинский, С. С. Лаппо, Л. Н. Рыкунов, Ю. И. Шокин. Специализированные лаборатории и научные группы, занимавшиеся изучением цунами, активно работали в те годы в Москве, Ленинграде, Минске, Обнинске, Киеве, Севастополе, Горьком, Новосибирске, Красноярске, Южно-Сахалинске, Владивостоке, Петропавловске-Камчатском.

Проблема генерации волн цунами, поиски физических механизмов, описывающих развитие процессов в источнике цунами, создание аналитических и численных моделей источника цунами – все эти задачи вызывали острый интерес исследователей. Эта тематика подогревалась также и творческой активностью наших заокеанских коллег-противников, которые тогда старательно разрабатывали методы создания искусственных цунами для поражения берегов потенциального противника. Но и советская команда тоже не дремала. В те годы сахалинские ученые (под руководством С. С. Лаппо) вместе с ленинградскими коллегами (под руководством Ю. С. Яковлева) занимались решением прикладной проблемы генерации искусственного цунами. Исключительно, конечно, для научных целей.

Тогда очень популярной среди ученых и политиков была книга “Если мир не наступит”, выпущенная в США как сборник статей нобелевских лауреатов на тему перспективных разработок для создания искусственных аналогов природных катастроф. Была в той книге и статья про искусственные землетрясения, содержащая некоторые, не сильно оригинальные, идеи о генерации искусственных цунами. Сахалинские ученые вместе с московскими и ленинградскими коллегами пробивались тогда через дебри теоретических и численных решений (а также финансовых рогаток) и вышли на крупномасштабный эксперимент, в котором ключевой идеей было создание изохроны – теоретической кривой, в точках которой одновременно возникают волновые возмущения, порождающие в процессе распространения волну типа цунами.

Испытательные бассейны, лабораторные гидростенды, модельные водоемы и даже экспедиционные полунатурные исследования в Приморье поставляли советским ученым ценнейший экспериментальный материал, который составлял основу научных публикаций, способствовал построению физических моделей и организации вычислительных экспериментов. Оригинальные взрывные эксперименты и генерация модельных цунами в испытательном водоеме “Новиково” (на юге о. Сахалин) и на полигоне “Мячково” в Люберцах привлекали внимание научного сообщества. Новиковский полигон посетили даже такие известные ученые как академик М. А. Лаврентьев и адмирал, профессор Ю. С. Яковлев (“Это был мой лучший ученик” – так сказал автору статьи о нем М. А. Лаврентьев в 1980-м году).

В тот период высокой активности советской науки (очень дружно работавшей с Министерством обороны СССР) было выполнено немало фундаментальных работ по изучению механизмов возникновения метеоцунами (генерируемых аномалиями атмосферного давления), оползневых цунами (вызванных сходом подводного оползня), а также цунами, создаваемых бегущей подвижкой дна и реализующих интригующий принцип синхронизма. В решении этих задач больших успехов добилась группа горьковских ученых под руководством Л. А. Островского. Теоретические и экспериментальные проработки условий возникновения вулканогенных цунами были впервые детально представлены и опубликованы группой сахалинских и ленинградских ученых.

Помимо важной во многих отношениях проблемы генерации цунами ученые активно занимались развитием вычислительных методов, решая проблему распространения волн в океане и даже задачи набегания волн на берег. Последние задачи, характеризующиеся сильной нелинейностью процессов, считались особенно сложными. В развитие вычислительных экспериментов по цунами большой вклад сделали ученые горьковской и новосибирской научных школ. Впервые советскими учеными была проведена натурная регистрация волн цунами в открытом океане.

Первые работы по созданию единой базы данных по цунами были начаты в СССР, и затем в России, под руководством новосибирского геофизика В. К. Гусякова (ИВМиМГ СО РАН). Эти работы активно поддерживались Международной океанографической комиссией

ЮНЕСКО, а также получали финансовую поддержку из грантов РФФИ, начиная с 1993 г. (Рис. 2).

Регулярно проводившиеся совещания по цунами и публикуемые сборники статей по проблемам цунами явно демонстрировали лидирующую позицию советской, а затем российской научной школы по этому направлению геофизики. Международные конференции по цунами, организованные в Новосибирске (1989), Петропавловске-Камчатском (1996), Москве (2000), Петропавловске-Камчатском (2002) собирали большое число российских и зарубежных участников и стимулировали активность ученых.

Карты цунами-районирования, подготовленные в конце века сотрудниками лаборатории цунами имени акад. С. Л. Соловьева Института океанологии РАН, были включены в первый Атлас МЧС РФ. Экземпляр эксклюзивного издания оригинального альбома “Волны цунами у берегов России” (выпущенного в 1997 году в ИО РАН под редакцией Б. В. Левина) был подарен Президенту Российской Федерации В. В. Путину Президентом Российской академии наук академиком Ю. С. Осиповым сразу после катастрофического цунами 26 декабря 2004 года.

3. Состояние проблемы цунами сегодня

Сильнейшие землетрясения и цунами, произошедшие на рубеже двух веков (Окушири, Япония, 1993; Шикотан, Россия, 1994; Измит, Турция, 1999; Суматра, Индонезия, 2004), явились естественным стимулом для подведения итогов наших знаний в области сейсмологии и цунами. Ведущие сейсмологи России – академики А. С. Алексеев и С. В. Гольдин, члены-корреспонденты РАН А. В. Николаев и Г. А. Соболев, – создавали научные проекты и программы государственного масштаба, собирали представительные научные форумы при поддержке грантов РФФИ, инициировали создание электронных каталогов событий, баз данных и развитие вычислительных методов в геофизике. Современные международные каталоги землетрясений NEIC, ISC, Гарвардский каталог, создаваемые в России каталоги Геофизической службы РАН, а также региональные каталоги (Сахалина, Камчатки) открывают широкие возможности для статистического анализа пространственно-временных закономерностей распределения землетрясений, детального изучения глобальной сейсмичности и создания новых подходов к решению животрепещущей проблемы прогноза землетрясений и предупреждения о цунами.

Очень важным решением явилось создание в 1996 году Программы поддержки ведущих научных школ России, которая стартовала по инициативе РФФИ (инициаторы Программы – академики В. Е. Фортов и В. Е. Захаров). В области сейсмологии сформировались и оформились в коллективы известные научные школы под руководством акад. С. В. Гольдина, чл.-корр. РАН Г. А. Соболева, профессоров В. Н. Трояна и Т. Б. Яновской. Научную школу исследователей цунами возглавил чл.-корр. РАН Б. В. Левин вместе с профессором Е. Н. Пелиновским. Финансирование научных школ позволило активизиро-

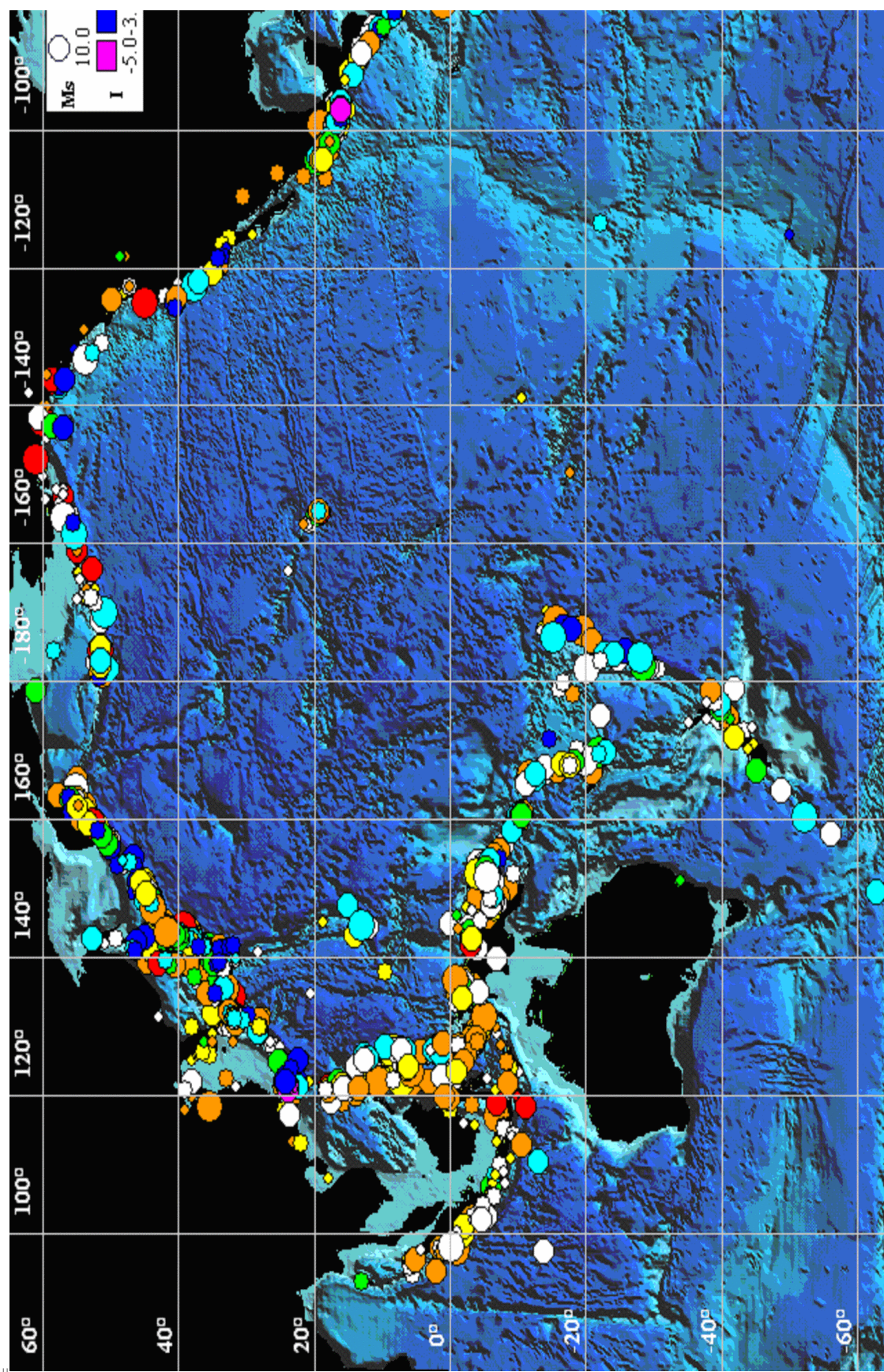


Рис. 2. Распределение очагов цунами в Тихоокеанском регионе за период с 47 ВС по 2004 г. Размер кружков соответствует магниту де землетрясения, цвет – интенсивности цунами.

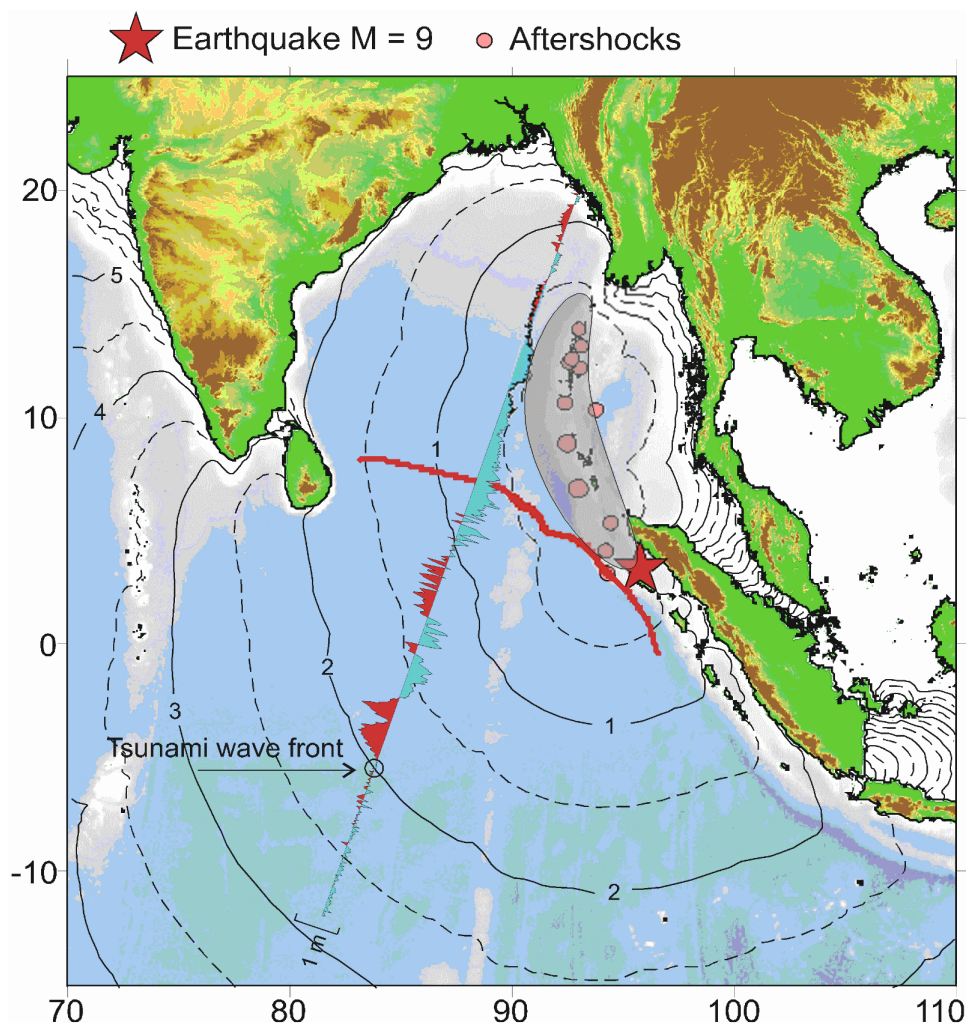


Рис. 3. Карта северо-восточной части Индийского океана с изохронами, показывающими вычисленные положения фронта цунами 24 декабря 2004 г., и трасса спутника IASON-1 (виток 109–129).

вать работу коллективов: создать постоянно действующие семинары, наладить систему регулярных командировок молодых сотрудников и аспирантов в экспедиции и на зарубежные конференции, организовывать российские конференции и научные экспедиции.

В области исследования цунами появилось новое научное направление – поиск следов древних цунами, или палеоцунами. Обнаружение следов и датирование палеоцунами на побережьях океанов и морей позволяет значительно расширить каталоги событий, тестировать решения задач по моделированию цунами и существенно повысить качество работ по оценке цунамиопасности пунктов побережья. Признанным специалистом международного класса в области палеоцунами является Т. К. Пинегина из Петропавловска-Камчатского (ИВиС ДВО РАН), детально исследовавшая со своими сотрудниками побережье Камчатки, Северных и Центральных Курильских островов. В области изучения отложений палеоцунами в экспедициях на Южных Курилах значительных результатов добились коллективы Н. Г. Разжигайевой (Владивосток, ТИГ ДВО РАН) и В. М. Кайстренко

Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН). Полевая экспедиция этих специалистов в Индонезию после события 2004 года, поддержанная грантами РФФИ, дала важные научные результаты.

В настоящее время активно развиваются работы по спутниковой регистрации цунами (ИО РАН, ИПФ РАН). Материалы альтиметрических наблюдений в радиодиапазоне совместно с реализацией вычислительных экспериментов по распространению волн позволили обнаружить несколько цунами в открытом океане и впервые получить надежные количественные измерения амплитуды цунами 2004 г. в Индийском океане, величина которой составила около 1 метра (Е. А. Куликов и др., ИО РАН). Следует отметить, что стремительное совершенствование вычислительных методов и программ, позволяющих моделировать распространение цунами в океане, открывает новые пути для изучения явления и своевременного предупреждения населения об опасности цунами (Рис. 3).

Среди разработок весьма перспективным в научном и практическом отношении представляется направление по раннему обнаружению локальных цунами методами

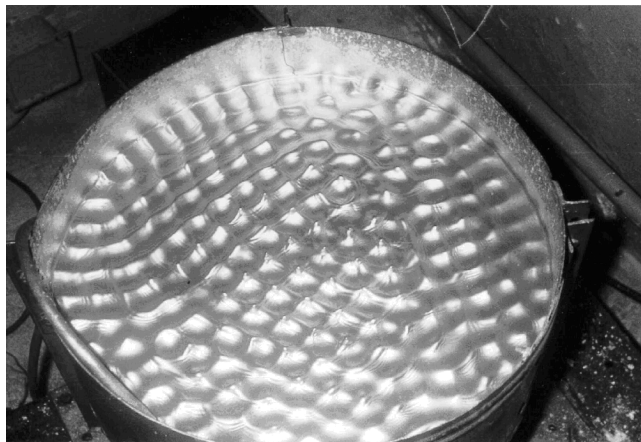


Рис. 4. Моделирование моретрясения на лабораторном стенде – квадратные и шестиугольные ячейки параметрических стоячих волн на поверхности колеблющейся жидкости.

гидроакустики, развиваемое Е. В. Сасоровой с сотрудниками в лаборатории цунами им. академика С. Л. Соловьева ИО РАН. Локальные цунами являются наиболее опасными событиями, поскольку их источники возникают очень близко к побережью. Например, для восточного побережья Камчатки среднее расстояние между источником цунами и берегом составляет 18 км. Гидроакустические антенны и системы гидрофонов позволяют обнаружить сигналы, возникающие в районе подготовки сильного землетрясения, и оценить уровень опасности готовящегося события задолго до начала землетрясения.

В последние несколько лет отмечается быстрое развитие работ по статистическому анализу особенностей возникновения цунами и землетрясений. Обнаружен 6-летний период возникновения цунами попеременно в Северном и Южном полушариях Земли (Б. В. Левин, Е. В. Сасорова). Выявлена внутригодовая неравномерность пиков сейсмической активности в большинстве субрегионов Тихоокеанского бассейна и прилегающего побережья. Показано, что активизация сейсмического процесса приурочена к зимним месяцам (декабрь–март), что справедливо как для Северного, так и для Южного полушария. Этот период совпадает с периодом прохождения Землей области, близкой к точке перигелия (3 января Земля находится на минимальном расстоянии от Солнца).

Изучение высокоэнергетических процессов в океане (моретрясения, акустическая кавитация, локальные выбросы воды), которые считаются родственными по отношению к явлению цунами, привело к открытию нового эффекта – охлаждения поверхности океана в зоне действия сильного подводного землетрясения. Эффект турбулентного переноса придонной холодной воды к поверхности из-за колебательных движений дна (получивший название сейсмоапвеллинга) был детально исследован чл.-корр. РАН Л. Н. Рыкуновым и молодым профессором М. А. Носовым вместе с учениками (Физический

факультет МГУ им. М. В. Ломоносова). Этой командой была собрана база данных по аномалиям температуры поверхности океана, выполнены впечатляющие лабораторные эксперименты по регистрации движения турбулентного фронта, построена теория процесса и созданы численные модели. Этот научный коллектив, изучая эффекты в источнике цунами, впервые получил результаты, убедительно свидетельствующие об определяющей роли сжимаемости воды для процесса генерации цунами. Лабораторное исследование моретрясений привело к обнаружению механизма генерации параметрических волн на поверхности воды (Рис. 4).

Следует отметить, что дальнейшее развитие работы по изучению сейсмоапвеллинга получили благодаря усилиям дальневосточных ученых. В рамках гранта РФФИ коллективом из сотрудников ИМГиГ ДВО РАН (Б. В. Левин, О. Н. Лихачева) и ДВНИГМИ, Владивосток (Е. П. Ураевский с сотрудниками) была создана интегрированная база данных, включающая вертикальные профили океанографических наблюдений в Мировом океане (свыше 7 млн. станций) и материалы сейсмических каталогов. База данных позволяет осуществлять поиск информации об измерениях, сделанных вблизи эпицентра подводного землетрясения до и после сейсмического события. Обнаружено много случаев, когда в верхнем 50-метровом слое после землетрясения отмечалось понижение температуры на 2–3 градуса, а на горизонте глубиной 200 м величина аномального изменения составила более 4 градусов.

В самые последние годы все больший интерес в научных кругах вызывают волны-убийцы. Это таинственное явление было известно довольно давно, но серьезному научному анализу данной проблемы препятствовали теоретические трудности. Недавно участники научной школы по цунами профессор Е. Н. Пелиновский и доктор А. А. Куркин с сотрудниками (ИПФ РАН, Нижний Новгород) выполнили цикл исследований и опубликовали книгу “Волны-убийцы”, получившую широкую известность в различных кругах общества. Было установлено, что такая волна представляет собой продукт взаимодействия нелинейных процессов и может рассматриваться как результат случайного сложения амплитуд различных ветровых волн на шельфе. Высота волны может достигать 25 м, а время, в течение которого волна возникает на поверхности моря, составляет примерно 5 секунд (Рис. 5).

Итоги исследования цунами и последние результаты в этой области науки подведены в двух монографиях, изданных в 2005 году на русском языке и в 2009 году – на английском. Первая книга “Физика цунами и родственных явлений в океане”, написанная в соавторстве Б. В. Левиным и М. А. Носовым, была издана при поддержке РФФИ и отмечена вниманием научного сообщества. Английское издание, “Physics of Tsunamis”, существенно переработанное по сравнению с русским вариантом книги, было организовано издательством Springer, которое хорошо известно своими классическими публикациями в области наук о Земле. Международное научное сообщество оценило факт издания этой книги как общественное признание заслуг российской школы исследова-

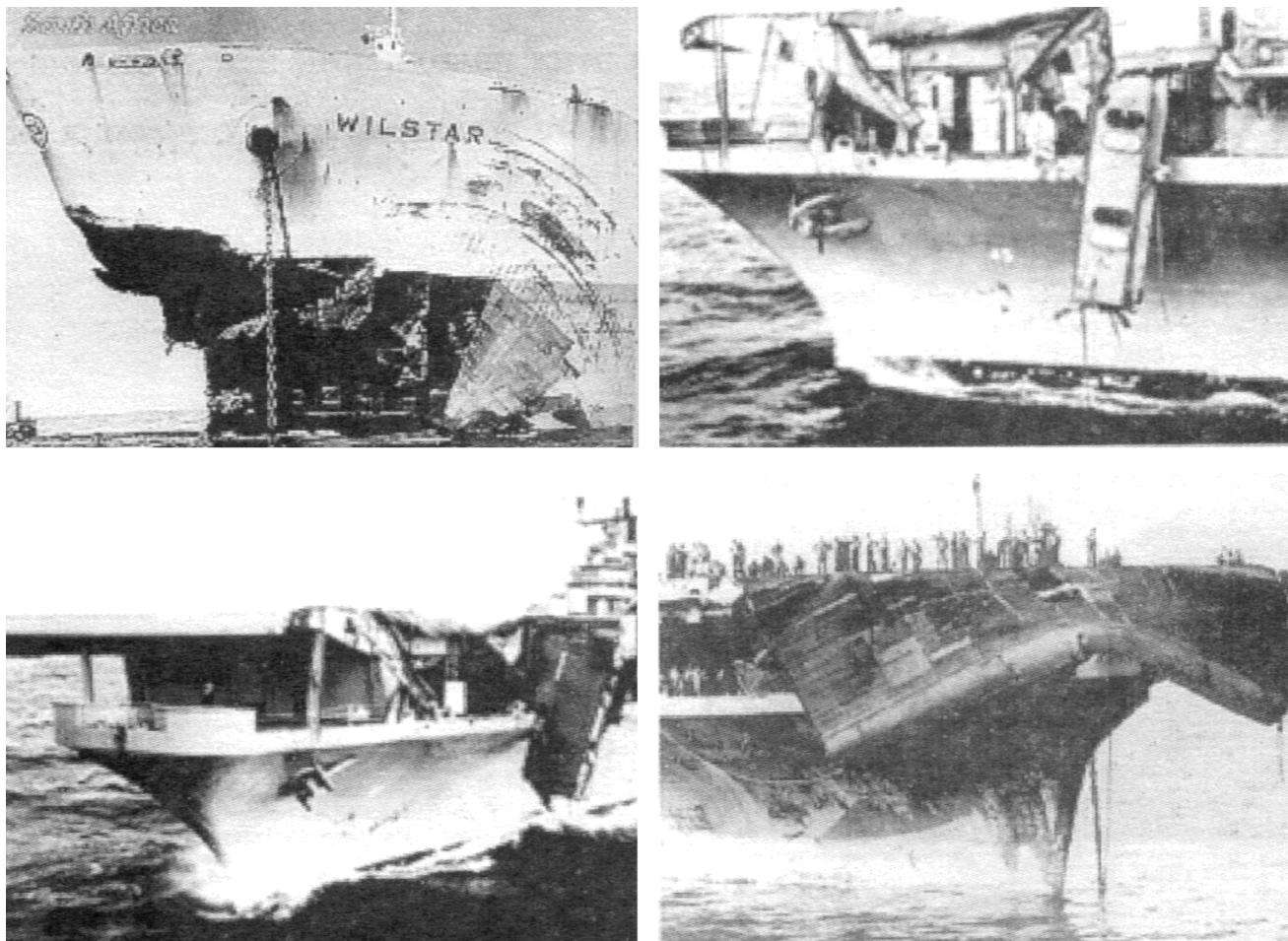


Рис. 5. Фотографии разрушений кораблей после встречи с волнами-убийцами.

телей цунами в мировом содружестве ученых за последние 20 лет (Рис. 6).

Одновременно с этой книгой вышел в свет сборник статей, посвященных последним достижениям в области изучения цунами. Эта книга с названием “Tsunamis”, 2009 (под ред. E. N. Bernard and A. R. Robinson) подготовлена к печати коллективом Гарвардского университета (США) с привлечением статей американских, русских и японских ученых.

4. Каковы перспективы в исследовании волн цунами и снижении риска через 20 лет

К наиболее перспективным направлениям исследований в области цунами следует отнести бурно развивающиеся работы в области спутниковой регистрации волн цунами в океане. В нашей стране значительные результаты в ближайшее время могут быть получены коллективами Института океанологии РАН (Москва) и Институ-

та прикладной физики РАН (Нижний Новгород). Очень важным направлением как для фундаментальной науки, так и для практических приложений является разработка методологии и создание карт цунамиопасности для различных регионов страны.

Утвержденная недавно Комиссия по цунами РАН (председателем Комиссии выбран в 2009 г. Б. В. Левин), выполнив анализ перспективных разработок, наметила план первоочередных задач для развития исследований в области цунами. Наряду с задачами систематического выпуска карт цунамиопасности, в перечень важнейших направлений включены работы по созданию каталогов древнейших цунами (палеоцунами), работы по гидроакустическому анализу процессов, предваряющих подготовку сильного подводного землетрясения и исследования по физическому и численному моделированию процессов генерации цунами и набеганию волны на берег.

В последнее время большой интерес вызывают перспективные исследования так называемых “космогенных цунами”, вызываемых падением в океан космического тела (астероида, метеорита и др.). Несмотря на очень малую вероятность возникновения такого события, гранди-

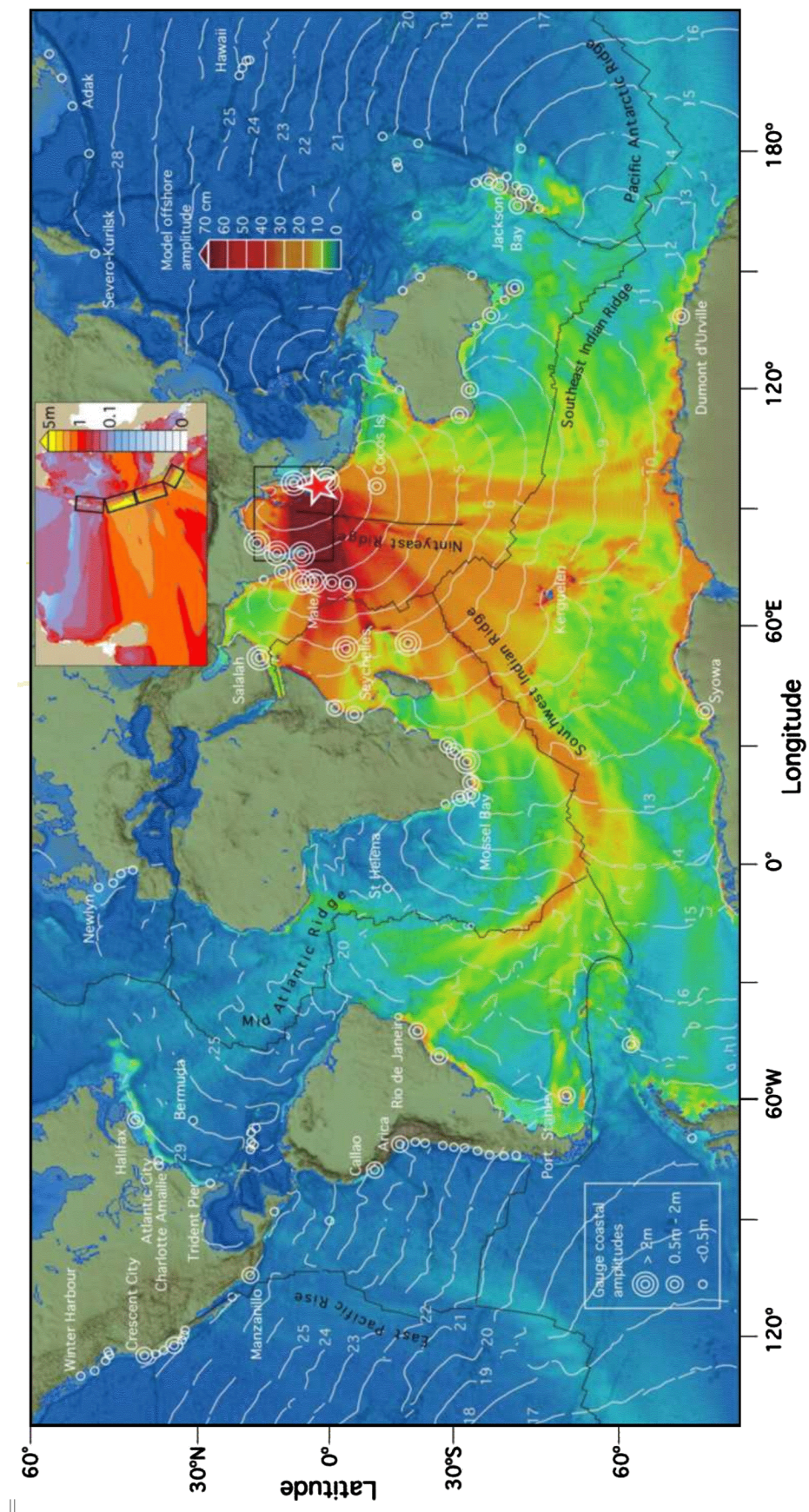


Рис. 6. Глобальная карта, показывающая распределение энергии цунами 24 декабря 2004 г., вычисленное с применением программы MOST.

озность эффекта может достичь уровня всемирной катастрофы. Поэтому развитие исследований по космическим источникам цунами будет, конечно, продолжаться по различным направлениям.

Федеральная целевая программа “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года” ориентирована на создание и модернизацию системы для оценки и анализа макросейсмических проявлений ощутимых землетрясений, а также развертывания сети сеймостанций сильных движений. Кроме того, предусмотрено создание единой системы информационно-обрабатывающих центров в регионах с высокой сейсмической активностью. Эти работы, безусловно, будут способствовать совершенствованию системы предупреждения о цунами.

Современные достижения в регистрации и изучении вариаций температуры поверхности океана (ТПО), успеши диагностики аномалий ТПО открывают новые возможности для изучения отклика гидросферы на глобаль-

ные сейсмические процессы, происходящие в литосфере Земли. Использование современных карт, содержащих аномалии ТПО, позволит создать методы анализа особенностей динамических процессов в океане, свидетельствующих о подготовке сильного сейсмического события в придонной части океана.

Отмеченная в последнее время международная интеграция усилий сейсмологов и специалистов по цунами указывает на необходимость дальнейшего развития этого направления. По-видимому, в ближайшее время можно ожидать создания Всемирной организации предупреждения о цунами, наподобие уже известного и успешно функционирующего агентства “Всемирная метеорологическая организация”.

Иллюстрации заимствованы из публикаций в книгах “Физика цунами и родственных явлений в океане”, М. ЯНУС-К. 2005, и “Physics of Tsunamis”, Springer, 2009.

Б. В. Левин, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск.