Экстремальные уровни озера Ханка: природные вариации или антропогенное воздействие?

М. В. Болгов[1]

Получено 5 сентября 2016 г.; принято 8 сентября 2016 г.; опубликовано 20 сентября 2016 г.

В статье рассматриваются факторы и закономерности формирования водного баланса трансграничного озера Ханка, уровни воды в котором в последние годы достигли экстремальных значений за весь инструментальный период наблюдений. Задача анализа и прогнозирования колебаний уровня решается с помощью вероятностных моделей компонент его водного баланса и динамико-стохастического моделирования гидрологического режима озера. Показано, что важными факторами, влияющими на гидрологический режим озера Ханка, являются антропогенные изменения водных ресурсов в результате развития орошаемого земледелия, особенно на Китайской части бассейна. Оценка роли создаваемых технических систем в экстремальном подъеме уровня озера и эффективности возможных мероприятий по снижению риска затопления прибрежных территорий выполнена методом многовариантных имитационных экспериментов с моделью гидрологической системы озера и его водосбора. *КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* Озеро Ханка; уровни воды; экстремальные значения; затопление прибрежных территорий; вероятностный прогноз; динамико-стохастическое моделирование; антропогенные изменения.

Ссылка: Болгов, М. В. (2016), Экстремальные уровни озера Ханка: природные вариации или антропогенное воздействие?, *Вестник ОНЗ РАН, 8,* NZ1001, doi:10.2205/2016NZ000127.

Введение

Сложным объектом геофизических и гидрометеорологических исследований являются бессточные и проточные внутренние водоемы, режим многолетних колебаний уровня которых характеризуется слабо предсказуемой динамикой. Примерами таких объектов являются “пульсирующее” озеро Чаны, расположенное в междуречье Оби и Иртыша, озеро Далайнор, питающееся за счет стока рек Монголии и Китая, система Торейских озер в Забайкалье, а также трансграничное российско-китайское озеро Ханка, расположенное на Дальнем Востоке. Основной причиной сложного, плохо предсказуемого поведения уровня этих озер являются случайные колебания так называемых побуждающих процессов (речного притока, осадков и испарения), временная изменчивость которых характеризуется наличием циклов или группировок лет повышенной или пониженной водности или испарения.

Изучение аномальных колебаний уровня воды основывается на решении стохастического дифференциального уравнения водного баланса водоема. В различных географических зонах соотношения между компонентами водного баланса могут существенно изменяться, но в целом механизм колебаний уровня заключается в следующем: объем воды в озере, в естественных, не нарушенных человеческой деятельностью условиях, накапливается за счет притока поверхностных и подземных вод, осадков на водную поверхность, и расходуется за счет испарения с водной поверхности и стока вытекающих рек. При повышении уровня воды увеличивается площадь водной поверхности и, соответственно, увеличивается объем испаряющейся воды, а также увеличивается сток вытекающей реки, что приводит к снижению темпов роста уровня. При понижении уровня воды в озере площадь водной поверхности сокращается, соответственно уменьшаются сток вытекающей реки и объем испарения, а темпы снижения уровня замедляются. Тем самым реализуется амортизационный механизм, рассмотренный еще в [*Крицкий и Менкель*, 1946] при анализе колебаний уровня Каспийского моря. В среднем уровень воды в озере колеблется около некоторого равновесного значения, также называемого уровнем тяготения (при уровне тяготения приходная часть баланса уравновешивается его расходной частью).

Для объяснения причин аномальных колебаний уровня недостаточно знания только среднего значения уровня воды в водоеме, необходимо располагать распределением вероятностей отклонений уровня от среднего положения.

[1]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

© 2016 Геофизический центр РАН.
http://onznews.wdcb.ru/doi/2016NZ000127-res.html

Рис. 1. Карта расположения озера Ханка и основных изучаемых водных объектов (www.rusatlas.ru).

Эти отклонения и определяют риски освоения прибрежных территорий. Сложность вероятностной задачи заключается в том, что последовательность объемов воды в озере не является последовательностью независимых случайных величин. Во временных рядах уровней озера, за счет интегрального эффекта, с большой вероятностью могут наблюдаться на первый взгляд необъяснимые, продолжительные периоды высокого или низкого стояния. Проблема заключается в том, что объем имеющихся последовательностей инструментально наблюденных уровней озер, особенно бессточных, совершенно недостаточен для получения надежных оценок параметров вероятностных моделей, поэтому для выяснения вероятного диапазона колебаний уровня необходимо динамико-стохастическое моделирование водного баланса, позволяющее учесть нелинейный характер морфометрических и гидравлических зависимостей, сложность вероятностных моделей стока и испарения, и получить прогнозные оценки для различных сценариев изменений климата и антропогенной деятельности на водосборе, основываясь на всем комплексе гидрологических знаний.

Важным фактором, влияющим на гидрологический режим озера, является антропогенное изменение водных ресурсов, наблюдаемое на водосборе оз. Ханка в результате развития орошаемого земледелия, в особенности на китайской части бассейна. Возделывание риса (а это основная сельскохозяйственная культура в рассматриваемом регионе) требует гарантированной подачи очень большого количества воды, что достигается за счет создания сложных технических систем переброски стока и его отведения.

Для учета влияния эксплуатации технических систем на аномальные колебания уровня озера Ханка, а также для оценки эффективности возможных мероприятий по снижению риска затопления прибрежных территорий, необходимо выполнение многовариантных имитационных экспериментов с моделью водноресурсной системы озера.

Первая попытка решения задачи прогноза уровня на основе нелинейной вероятностной модели озера Ханка была предпринята в 1988 г. К. Г. Бакановым в рамках диссертационного исследования [*Баканов*, 1988] Ограниченность вычислительных возможностей и чрезмерное упрощение вероятностной модели колебаний уровня воды в озере (сведение задачи к решению уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова) не позволили автору получить достаточно надежных выводов, и, кроме того, в модели не учитывались масштабы хозяйственной деятельности на китайской части водосбора, информация о которой в те годы была весьма ограничена.

В недавно вышедшей работе [*Бортина и Горчаков*, 2016] выполнен обзор имеющихся в литературе сведений о гидрологическом режиме озера и рассмотрены некоторые гипотезы относительно причин аномального роста уровней Ханки. Однако количественными оценками масштабов использования водных ресурсов на китайской стороне авторы этой работы также не располагали, что, в совокупности с другими обстоятельствами, не позволило им выйти на долгосрочный вероятностный прогноз уровенного режима.

В данной статье рассматриваются особенности гидрологического режима озера Ханка, параметры вероятностных моделей основных гидрологических процессов, характер водопользования в бассейне озера и на соседних территориях, оценивается возможный эффект от реализации мероприятий по управлению его уровенным режимом с целью снижения максимальных уровней воды.

Результаты, полученные в данной работе, основаны на обобщении данных гидрометеорологических наблюдений, собранных и проанализированных в рамках проекта “Научные исследования по изучению гидрологических особенностей водного режима озера Ханка в целях определения причин аномального повышения уровня воды и выработки научно-обоснованных предложений по регулированию уровня воды в озере, формированию комплекса мер по снижению негативного воздействия вод озера на территории Приморского края” [*Отчет...*, 2016].

Современное состояние и особенности гидрометеорологии озера Ханка и его бассейна

Характер естественных колебаний уровня озера Ханка определяется особенностями гидрологического режима водосборной территории, строения гидрографической сети и морфологии озера. Водосбор трансграничного озера Ханка расположен на территории Приморского Края России (большая часть) и Китайской провинции Хейлунцзян (Рис. 1). Вытекающая из озера р. Сунгача является притоком трансграничной р. Уссури, которая впадает в р. Амур в районе г. Хабаровск.

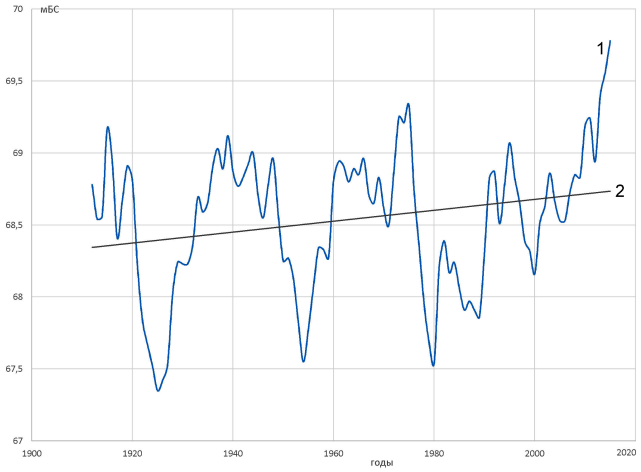

Рис. 2. Многолетние колебания среднегодовых уровней воды в оз. Ханка по данным уровнемерных постов Росгидромета [*Отчет...*, 2016]. 1 – уровень, 2 – линейный тренд.

Рис. 3. Разрушение объекта на берегу оз. Ханка в районе п. Астраханка в результате подъема уровня воды в мае 2016 г. (фото автора).

Основное питание озеро получает за счет дождевых осадков, как в виде поверхностного притока, так и осадков, выпадающих непосредственно на водную поверхность. Особенностью режима озера является то, что среднемноголетний слой испарения с водной поверхности примерно равен слою осадков, и корреляция между этими величинами отсутствует. Озеро неглубокое, и вдольбереговой транспорт наносов, осуществляющийся в форме кос и гряд, может существенно изменять условия стока воды из озера. На условия стока из озера также может влиять гидравлический подпор, возникающий в результате впадения в р. Сунгача притоков, сбросных каналов, а также за счет подъема уровней в р. Уссури при прохождении паводков. Комплекс естественных факторов, обусловленных вариациями климата, а также антропогенное влияние в виде объема забираемых и дополнительно сбрасываемых вод, приводят к возникновению условий, способствующих аномальному росту уровня воды озера.

Рассмотрим далее основные характеристики уровенного режима и факторы, влияющие на его аномальное поведение.

Уровенный режим озера Ханка

Уровенный режим озера определяется набором динамических (короткопериодных) и эвстатических колебаний, последние вызываются изменением объема воды в озере. В работе [*Васьковский*, 1978], обобщающей сведения о гидрологическом режиме озера, имевшиеся на конец 70-х годов прошлого века, подробно рассмотрены ветровые денивиляции, сейшевые колебания, характеристики волнения. Весьма значительными, в силу особенностей морфометрии чаши озера, могут быть ветровые нагоны на Ханке, но наибольший интерес представляют эвстатические колебания, демонстрирующие в последние годы экстремальное поведение.

Уровни воды в озере измеряются на нескольких водомерных постах с начала прошлого века и являются наиболее изученной гидрологической характеристикой.

Анализ многолетних колебаний уровня воды в озере показывает (Рис. 2), что высокие стояния уровня в озере наблюдались регулярно на протяжении более 100 лет наблюдений, но последний подъем уровня был наибольшим за весь инструментальный период и привел к значительным ущербам на прибрежных территориях (Рис. 3). Статистические характеристики уровенного режима приведены в Табл. 1 для различных периодов наблюдений. Можно отметить высокий коэффициент автокорреляции годовых последовательностей уровня, что в целом свойственно замкнутым и слабо-проточным водоемам, коэффициент водообмена которых невелик.

Речной приток к озеру Ханка

Наблюдения за стоком рек в бассейне озера Ханка начались, в основном, в послевоенный период, поэтому оценить все компоненты водного баланса озера можно за последние 65 лет. Приток к озеру получен в [*Отчет...*, 2016] по данным о стоке впадающих рек на российской части бассейна (Рис. 4). Колебания стока носят стационарный характер, имеют малый коэффициент автокорреляции и повышенный коэффициент вариации ($C_v = 0,48$). Плотность сети пунктов гидрологических наблюдений и объем имеющегося ряда наблюдений позволяют утверждать, что приток с собственной водосборной площади озера Ханка изучен достаточно надежно.

Осадки на водную поверхность озера Ханка

Дождевые осадки являются важной составляющей баланса озера, поскольку площадь водной поверхности велика (около 4000 км^2). Определение осадков на водную

Табл. 1. Оценки статистических характеристик годовых значений компонент водного баланса оз. Ханка, принятые для стохастического моделирования

Ряд наблюдений	Параметры распределения				
	Среднее	C_v	C_s	C_s/C_v	$r(1)$
Приток	1,85 км^3	0,48	1,14	2,5	0,1
Осадки	632 мм	0,17	0,51	3,0	0,1
Испарение	666 мм	0,09	0,09	1,0	0,3
Уровень воды (до 1986 г.)	287 см (68,48 м)*	0,17	$-0,59$	$-3,5$	0,85
Уровень воды (после 1986 г.)	308 см (68,69 м)*	0,15	0,19	1,2	0,86
Уровень воды (весь ряд)	293 см (68,54 м)*	0,17	$-0,37$	$-2,2$	0,86

* – в БС77

поверхность выполнено в [*Отчет...*, 2016] по данным наблюдений на трех метеорологических станциях, расположенных по периметру озера на территории РФ. Во временном ходе годовых сумм осадков (Рис. 5) не обнаруживается нарушения стационарности. Последовательность годовых сумм осадков, так же как и величин стока, характеризуется малым коэффициентом автокорреляции. Коэффициент вариации осадков мал, что является характерной особенностью процесса в изучаемом регионе

Испарение с водной поверхности озера Ханка

Наименее точно из всех компонент водного баланса озера оценивается испарение с водной поверхности, так как данная величина непосредственно на озере не измеряется. Стандартные наблюдения за испарением с водной поверхности ведутся на сети Росгидромета с помощью испарителя ГГИ-3000, но эти приборы расположены на суше, и их данные не всегда репрезентативны. В рамках программы работ озерной станции Приморского УГМС “Астраханка” на побережье озера ведутся наблюдения за испарением с помощью испарительного бассейна большой площади (20 м^2, Рис. 6). Испарительный бассейн позволяет получать существенно более надежные данные об изучаемом процессе.

Результаты наблюдений за испарением позволяют говорить о наличии заметного тренда на снижение в последние 30 лет (Рис. 7). Расчеты, выполненные в ГГИ с помощью различных полуэмпирических методов [*Отчет...*, 2016], эту особенность подтвердили, при этом в качестве основного фактора снижения испарения отмечено снижение скорости ветра в регионе. В качестве особенности временного ряда испарения надо отметить срав-

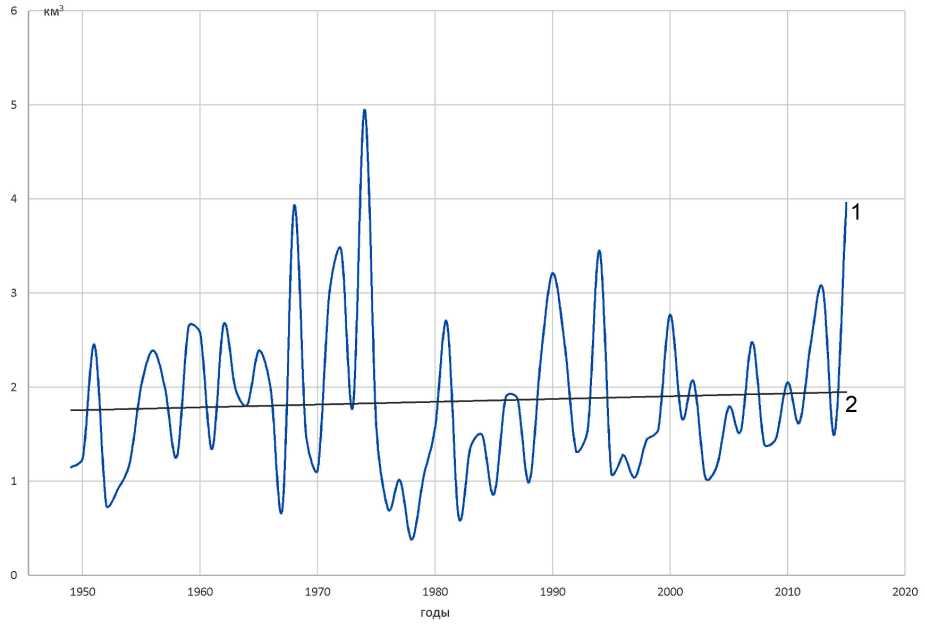

Рис. 4. Многолетние колебания суммарного речного притока к озеру Ханка. 1 – приток, 2 – линейный тренд.

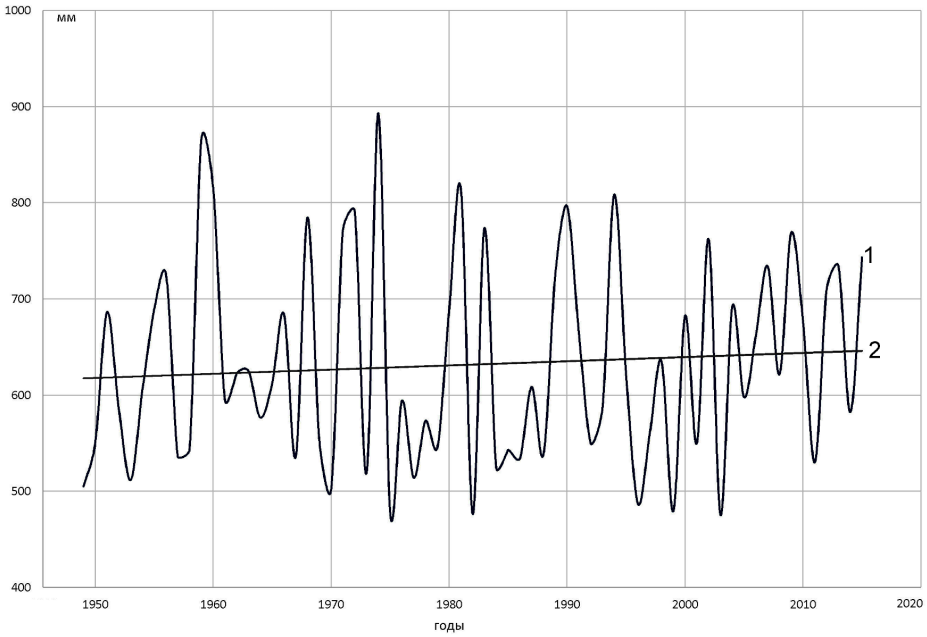

Рис. 5. Многолетние колебания годовых сумм осадков на акватории озера Ханка. 1 – осадки, 2 – линейный тренд.

нительно большое значение первого коэффициента автокорреляции ($r(1) = 0,3$). Тренд в ряду величин испарения и высокая автокорреляция могут служить дополнительными факторами возникновения естественного затяжного периода повышения уровня воды в озере Ханка в последние десятилетия.

Сток воды из озера Ханка

Весьма приближенно определяемой характеристикой баланса озера является годовой сток трансграничной реки Сунгача, вытекающей из озера Ханка. Наблюдения за стоком реки крайне нерегулярны и ограничены эпизодическими измерениями расходов, причем в последние годы это осуществляется в рамках российско-китайского мониторинга качества вод трансграничных водных объектов при отборе проб воды на химический анализ. Известно, что кроме уровня воды в озере, сток р. Сунгача определяется также отметкой бара в истоке, т.е. пропускной способностью данного участка русла [*Васьковский*, 1978]. Обработка имеющихся данных измерений и расчеты, выполненные в [*Отчет...*, 2016], позволили восстановить значения величин годового стока воды из озера (Рис. 8). Колебания оттока из озера в целом следуют колебаниям уровня воды в озере и также характеризуются большим значением первого коэффициента автокорреляции.

Рис. 6. Испарительный бассейн на озерной станции “Астраханка” (фото автора).

В Табл. 2 приведена матрица коэффициентов парной корреляции годовых значений компонент водного баланса озера Ханка, используемых в дальнейшем при стохастическом моделировании искусственных рядов стока, осадков и испарения.

Использование водных ресурсов на китайской части бассейна озера Ханка и реке Мулинхэ

Основное назначение системы использования водных ресурсов КНР на оз. Ханка, Малая Ханка и р. Мулинхэ заключается в борьбе с наводнениями и в обеспечении водой рисовых оросительных систем (РОС), площадь которых составляет более 0,66 млн га. Водоресурсная система (Рис. 9, Рис. 10 и Рис. 11) включает:

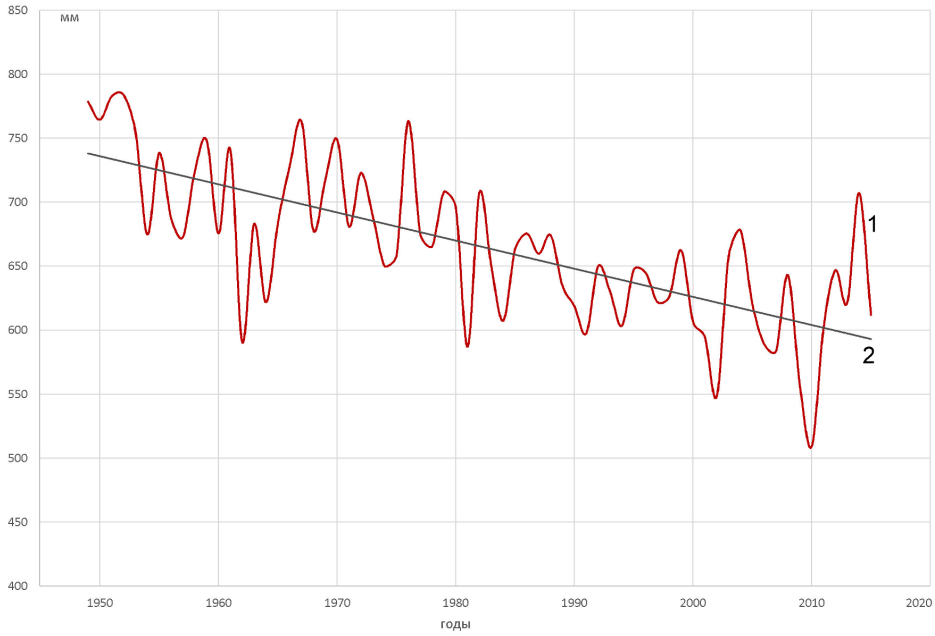

Рис. 7. Испарение с водной поверхности озера Ханка. 1 – испарение, 2 – линейный тренд.

1. вододелитель на р. Мулинхэ;
2. канал Мусин, подающий воду из реки Мулинхэ в район расположения РОС и бассейн Малой Ханки;
3. распределительное водохранилище;
4. два сбросных канала, отводящих воду из водохранилища на РОС и в р. Сунгача;
5. оз. Малая Ханка, используемое как водоем-накопитель;
6. три гидротехнических сооружения (ГТС) на перешейке между оз. Малая Ханка и оз. Ханка, осуществляющие сброс излишков воды и перекачку воды из озера Ханка в Малую Ханку.

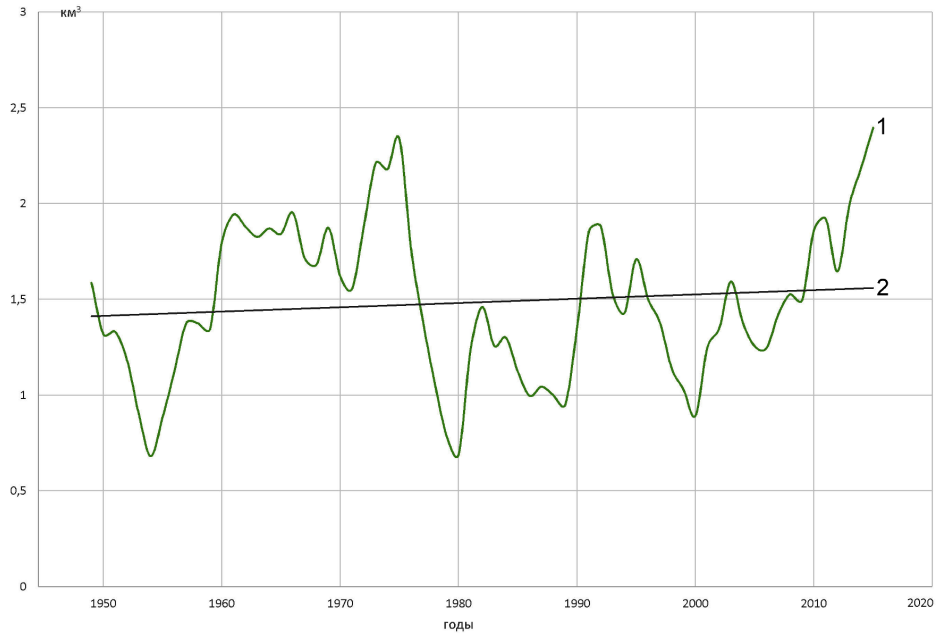

Рис. 8. Многолетние колебания стока воды из озера Ханка. 1 – сток, 2 – линейный тренд.

Табл. 2. Корреляционная матрица годовых значений компонент водного баланса оз. Ханка

	Приток	Осадки	Испарение
Приток	1,0	0,8	$-0,3$
Осадки	0,8	1,0	$-0,2$
Испарение	$-0,3$	$-0,2$	1,0

Вододелитель на р. Мулинхэ

Вододелитель на р. Мулинхэ был построен в 1942 г. во время японской оккупации этой территории Китая в 5,5 км ниже ответвления канала Мусин. Вододелитель представляет собой плоский затвор шириной 12 м с пропускной способностью до 120 м^3/с (Рис. 9). В 1970 г. система была реконструирована китайскими специалистами.

Вододеление осуществляется с помощью регулирующего сооружения на р. Мулинхэ и канала Мусин, по которому вода этой реки направляется в сторону оз. Ханка (Рис. 9). Основное назначение вододелителя – подача воды в систему водохранилищ (включая оз. Малая Ханка) для дальнейшего использования на оросительных системах, а также защита от затопления территорий в бассейне р. Мулинхэ ниже вододелителя при прохождении дождевых паводков.

Канал Мусин

За счет подпора, создаваемого вододелителем, значительная часть стока р. Мулинхэ направляется в канал Мусин (другое название – японский канал), на котором регулирующие сооружения отсутствуют (Рис. 10). Ширина канала в районе автодорожного моста составляет около 60 м. Канал Мусин в нижней части разветвляется на несколько рукавов, часть которых заканчивается в оз. Малая Ханка.

Распределительное водохранилище

Основной рукав канала Мусин заканчивается водохранилищем, связанным с оз. Малая Ханка несколькими протоками. Из водохранилища часть воды используется непосредственно на примыкающих оросительных системах, а остальная вода отводится двумя каналами в р. Сунгача, по пути распределяясь также на оросительные системы. Сбросы воды с оросительных систем также осуществляются в р. Сунгача.

Озеро Малая Ханка

Озеро Малая Ханка отделено от оз. Ханка перешейком, на котором расположены туристические базы, причалы, рыболовецкие хозяйства, автомобильная дорога, а также три гидротехнических сооружения, регулирующие водообмен между озерами (водосбросы и насосные станции) (Рис. 11).

Уровень воды в оз. Малая Ханка на момент обследования (4.06.2016 г.), по устным сведениям, предоставленным китайской стороной, составлял 71,36 м в системе высот Желтого моря, принятой в Китае. В оз. Ханка уровень был 70,90 м. Перепад уровней составил 46 см.

Приходными составляющими водного баланса оз. Малая Ханка являются: осадки на водную поверхность, сток с собственной водосборной территории, переброска стока из р. Мулинхэ по каналу Мусин, закачка воды насосными станциями из оз. Ханка при недостатке воды в озере для водообеспечения оросительных систем. Расходные составляющие баланса: испарение с водной поверхности, забор воды в оросительные системы, а также сбросы в оз. Ханка при росте уровня воды выше критического значения 71,2 м (устное сообщение китайских специалистов). Возможна также фильтрация через перешеек, сложенный песчаными отложениями, однако при небольшом перепаде уровней воды этой составляющей можно пренебречь.

ГТС на перешейке между оз. Малая Ханка и Ханка

ГТС №1 (Рис. 11б) представляет собой сбросное сооружение, состоящее из 10 пролетов шириной по 8 м. На момент обследования осуществлялся сброс воды с расходом 22 м^3/с. Других сведений о режиме работы ГТС нет.

Сбросная часть ГТС № 2 имеет аналогичную конструкцию, состоящую из 8 сегментных затворов, обеспечивающих максимальный расход до 100 м^3/с. Насосная станция (Рис. 11а), состоящая из 2-х блоков по 10 насосов производительностью по 5 м^3/с каждый, примыкает непосредственно к водосбросу.

Основные выводы о функционировании воднoресурсной системы КНР на оз. Ханка, Малая Ханка и р. Мулинхэ и ее влиянии на уровень воды в оз. Ханка

Имеющиеся сведения о конструктивных решениях системы переброски стока позволяют сделать вывод о том, что оз. Малая Ханка выполняет функцию водоема-накопителя для водоснабжения рисовых оросительных систем. Вместе с тем, наличие водосбросных сооружений общей пропускной способностью до 200 м^3/с свидетельствует о том, что китайской стороной они предназначены для сброса именно паводковых вод реки Мулинхэ, т.к. собственный водосбор оз. Малая Ханка очень мал, и сток с него не может достигать таких больших значений.

Анализ функционирования существующей водохозяйственной системы КНР на оз. Ханка с использованием стока р. Мулинхэ и имеющиеся характеристики ГТС указывают на то, что возможно заметное негативное воздействие этой системы на уровенный режим оз. Ханка.

Рис. 9. Вододелитель на р. Мулинхэ со стороны верхнего бьефа (а) и со стороны дамбы (дороги) (б) (фото автора).

Рис. 10. Канал Мусин, отводящий сток р. Мулинхэ (фото автора).

Рис. 11. Гидротехнические сооружения, расположенные на перешейке между оз. Ханка и Малая Ханка (территория КНР): а) насосная станция, б) сбросной гидроузел (фото автора).

В условиях лет средней водности забираемый из р. Мулинхэ сток в размере около 700 млн м^3 в год полностью расходуется на нужды рисосеяния. На баланс оз. Ханка этот объем может не оказывать влияния, поскольку сбросы с орошаемых массивов осуществляются в основном в р. Сунгача, а дополнительная закачка из оз. Ханка не осуществляется. При пониженной водности р. Мулинхэ можно предположить, что собственных водных ресурсов реки в сложившихся условиях будет недостаточно для обеспечения нужд орошения, в результате чего осуществляется забор воды из оз. Ханка в оз. Малая Ханка с помощью насосных станций, максимальная производительность которых 100 м^3/с. В многоводные годы из р. Мулинхэ в канал Мусин будет поступать повышенный расход воды, поскольку шлюз-регулятор на р. Мулинхэ ограничивает сток реки ниже канала, а сток в сам канал ничем не регулируется. Во избежание затопления орошаемых массивов и селитебных территорий, все излишки воды китайской стороной будут сбрасываться в оз. Малая Ханка, а оттуда, через сбросные ГТС – в оз. Ханка. Как отмечено выше, величина сброса может достигать 200 м^3/с. Если предположить, что в многоводный период в оз. Ханка будет сбрасываться 100 м^3/с, то за 4 месяца работы водосброса в озеро поступит дополнительно около 1 км^3 воды, что может привести к дополнительному росту уровня воды примерно на 20–25 см.

Функционирование и развитие системы использования водных ресурсов КНР в бассейне оз. Ханка в существующем варианте приведет к увеличению амплитуды колебаний уровня воды в озере по сравнению с естественными условиями. Количественная оценка этих изменений, с учетом различных вариантов использования водных ресурсов, получена далее на основе динамико-стохастического моделирования уровенного режима водоема.

Динамико-стохастическая водобалансовая модель многолетних колебаний уровня оз. Ханка на основе статистических моделей элементов водного баланса озера

Для оценки вероятностей достижения критических уровней воды в озере, характеризующих степень “аномальности” ситуации, и для планирования технических мероприятий на озере и его водосборе в целях управления его уровенным режимом, необходим долгосрочный прогноз уровня в вероятностной форме. Эффективным методом получения такого прогноза является динамико-стохастическое моделирование колебаний уровня водоема на основе уравнения водного баланса и вероятностных моделей колебаний его составляющих – притока, осадков и испарения. Сток из озера является функцией уровня озера и рассчитывается по гидравлическим зависимостям. Таким образом получается модель колебаний уровня озера, а решение соответствующих разностных уравнений осуществляется методом имитационного моделирования.

Одномерные стохастические модели составляющих водного баланса оз. Ханка

Представления о характере колебаний исследуемых гидрометеорологических процессов как о стохастическом случайном процессе позволяют применять аппарат теории случайных функций и вероятностные методы для описания многолетних последовательностей годовых величин стока, испарения и осадков. Случайная величина X полностью описывается с вероятностной точки зрения заданием закона ее распределения (или плотностью вероятности) $p(x)$, устанавливающего связь между возможными значениями ее величины и соответствующими им вероятностями. В марковском случае для описания случайной величины достаточно задания двумерного закона распределения $p(x, y)$ [*Свешников*, 1968; *Тихонов и Миронов*, 1977]. Зададим двумерный закон распределения $p(x, y)$ в виде билинейного разложения в ряд симметрического ядра корреляционного интегрального уравнения по ортонормированным собственным функциям [*Сарманов*, 1961]. Для генерации искусственных рядов стока, испарения и осадков из заданного двумерного распределения получаем условное распределение, которое в интегральном виде имеет вид:

$$F(y/x) = \int_0^y p_2(y) \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k P_k(x) P_k(y) \right] dy \qquad (1)$$

где $p_2(y)$ – одномерное распределение, $P_k(x)$ и $P_k(y)$ – ортонормированные полиномы, R – коэффициент корреляции между случайными величинами X и Y.

Моделирование случайных значений в марковском случае осуществляется следующим образом. Генерируется последовательность случайных чисел, равномерно распределенных в интервале $[0, 1]$, которые принимаются за значения условной функции распределения $F(y/x)$. Для нахождения случайного значения y при заданном x (где x – предыдущее значение процесса) ищется верхний предел y интеграла в правой части уравнения (1) так, чтобы интеграл был равен случайно сгенерированному числу, т.е. функции $F(y/x)$. Полученное значение y подставляется вместо x, и вся процедура повторяется необходимое число раз, обеспечивая тем самым моделирование случайной временной последовательности необходимой длины и с заданными свойствами (марковость случайного процесса и параметры безусловных распределений).

Далее на основании уравнения водного баланса озера определяются (рассчитываются) реализации выходного процесса – изменения уровенного режима озера и связанный с ним сток (расход) р. Сунгача.

Основным требованием к стохастической модели является условие воспроизведения статистических характеристик выборочной (наблюденной) реализации случайного процесса – среднего, коэффициента вариации C_v и коэффициента автокорреляции $r(1)$, хотя последнему удовлетворить трудно из-за большой погрешности определения $r(1)$ по коротким рядам наблюдений. Выборочные оценки параметров распределения компонент водного баланса и уровней оз. Ханки приведены в Табл. 1.

Рассмотренная схема моделирования искусственных рядов предполагает, что рассматриваемые процессы являются попарно независимыми. Из анализа корреляционной матрицы компонент водного баланса (Табл. 2) очевидно следует, что, если корреляцией между осадками и испарением и притоком и испарением еще можно пренебречь, то предположить то же самое относительно корреляции между осадками и притоком уже не представляется возможным. Таким образом, перед нами стоит задача моделирования искусственных рядов попарно коррелированных случайных процессов, которые образуют трехмерный марковский процесс.

Моделирование многомерных последовательностей

Задача моделирования многомерных последовательностей случайных величин (в данном случае стока, осадков и испарения) может быть решена разными по сложности и теоретической завершенности методами. В данном случае применен метод, основанный на разложении полей гидрометеорологических характеристик по совокупностям естественных ортогональных функций (ЕОФ) [*Багров*, 1959; *Болгов*, 1994], который позволяет моделировать нормально распределенные искусственные последовательности, удовлетворяющие корреляционной матрице исходных (наблюденных) гидрометеорологических процессов.

Известно, что любое индивидуальное поле из имеющейся совокупности полей можно разложить по собственным функциям, которые заранее неизвестны и должны быть определены по данным имеющейся совокупности полей, свойства которых определяют индивидуальные особенности искомых функций [*Багров*, 1959]. Искомая совокупность собственных функций может быть определена как совокупность собственных векторов корреляционной матрицы исследуемой последовательности полей. В основу определения собственных векторов (собственных функций) положен итерационный алгоритм [*Фаддеев и Фаддеева*, 1963].

Таким образом, исходная последовательность полей представлена в виде совокупностей собственных векторов (функций) и коэффициентов разложения по ним, являющихся попарно некоррелированными случайными процессами. При наличии продолжительных рядов наблюдений в результате вычислений получаются последовательности коэффициентов разложения, для которых подбирается стохастическая модель, в нашем случае – авторегрессионная первого порядка (или марковская). Выбрав стохастическую модель процесса, получаем возможность воспроизводить (генерировать) искусственные реализации необходимой длины. Заметим, что речь идет о последовательностях коэффициентов разложения по собственным функциям, которые изучаются с помощью модели (1), но в которой используются ортогональные полиномы Эрмита, т.е. задача сводится к классическому процессу Орштейна-Уленбека.

На заключительном этапе искусственные последовательности попарно некоррелированных коэффициентов разложения пересчитываются в нормализованные значения изучаемых полей. Преобразование классического нормального распределения производится сначала в совместное распределение обеспеченностей, а затем – в распределение величин с трехпараметрическим гамма-распределением Крицкого-Менкеля, которое хорошо описывает распределение случайных величин компонент водного баланса озера Ханка.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет воспроизводить в имитационном режиме последовательности случайных величин, имеющие трехпараметрический закон распределения, заданный вид взаимно- и автокорреляционных функций.

Имитационное моделирование компонент водного баланса оз. Ханка

На основе рассмотренного метода осуществлено моделирование последовательностей годовых значений для всех составляющих элементов водного баланса оз. Ханка.

Предлагаемый способ моделирования многомерных гидрологических характеристик предусматривает переход от гамма-распределенных величин к их обеспеченностям, а затем к нормально распределенным числам. Оценив ковариационную матрицу последовательностей компонент водного баланса (Табл. 2), получим ее собственные вектора упоминавшимся итерационным методом.

Имея собственные вектора и задав авто- и взаимокорреляционные функции последовательностей, имеющих нормальное распределение, вычислим на основе теоремы о линейном преобразовании случайной функции автоковариационные функции коэффициентов разложения по ЕОФ и параметры их авторегрессионных моделей. После вычисления всех необходимых параметров моделируется трехмерный вектор объемом 100 000 членов, компоненты которого имеют нормальное распределение. Заключительный этап моделирования – переход к гамма-распределенным величинам – осуществляется с помощью таблиц распределения С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля. В результате моделирования будем иметь 100 000 среднегодовых значений для трех исследуемых характеристик (осадки, испарение и приток), используемые в дальнейших расчетах.

Имитационное моделирование уровенного режима озера Ханка

Реализации процесса наполнения озера и связанного с ним расхода р. Сунгача получаются с помощью решения уравнения водного баланса озера в конечно-разностной форме с использованием зависимости площади водной поверхности от уровня и зависимости расхода (стока) от уровня озера.

Для выяснения особенностей формирования экстремальных уровней воды и оценки последствий антропогенного воздействия на уровенный режим озера расчеты водного баланса выполнены для четырех вариантов

Табл. 3. Варианты различных условий оттока из озера и сценариев использования стока р. Мулинхэ для динамико-стохастического моделирования уровня воды в озере Ханка

Вариант	Режимы использования водных ресурсов (сценарии)	Отметка порога (бара) в истоке р. Сунгач, см над нулем графика
1	Естественный режим	125
2	Естественный режим	180
3	Переброска стока р. Мулинхэ и забор воды из оз. Ханка	125
4	Переброска стока р. Мулинхэ и забор воды из оз. Ханка	180

водопользования, включающих различные условия оттока из озера и сценарии использования стока р. Мулинхэ (Табл. 3). Результаты стохастического моделирования уровня для разных вариантов в виде параметров распределений уровня приведены в Табл. 4.

Смоделированные искусственные ряды притока, испарения и осадков делились на отрезки по 50 лет, и расчет будущих значений уровня многократно повторялся при одном и том же начальном наполнении озера (69,9 м БС), соответствующем состоянию озера на 01.01.2016 г.

Полученные распределения уровня воды в озере Ханка с заблаговременностью до 50 лет различной обеспеченности (1%, 10%, 50%, 90% и 99%) приведены на Рис. 12 для различных вариантов расчетов. Прогнозные кривые распределения для всех четырех вариантов расчета 1%-ной и 50%-ной обеспеченности приведены на Рис. 13 и Рис. 14, соответственно.

Обсуждение результатов и выводы

Анализ результатов мониторинга гидрометеорологических процессов в бассейне озера Ханка и модельные расчеты водного баланса озера дали возможность ответить на вопрос о причинах аномально высокого стояния уровня воды.

Вероятностные модели временной изменчивости гидрометеорологических процессов, отражающие характер естественных колебаний увлажненности в регионе, показывают, что возможный интервал колебаний уровня в естественных условиях достаточно большой. С обеспеченностью 1%, среднегодовой уровень воды в озере превысит отметку 70,0 м БС77 во всех рассмотренных сценариях. Среднеквадратическое отклонение уровня в современных климатических условиях составляет 0,5 м.

Существенным фактором изменения характеристик уровня воды являются условия стока из озера (пропускная способность русла в истоке). Изменение отметки бара может приводить к увеличению среднего многолетнего уровня озера на 0,3 м при сохранении дисперсии колебаний. Экстремальные уровни, представляющие интерес при решении прикладных задач, увеличатся на 0,5 м. Данное обстоятельство в существенной мере определяет направление разработки мероприятий по снижению максимальных расчетных уровней воды в озере. Подход к регулированию уровня воды в озере заключается в увеличении пропускной способности каналов и водотоков, по которым осуществляется сброс воды из озера Ханка. Эффект от восстановления пропускной способности сбросных каналов весьма существенен, особенно для высоких уровней малой обеспеченности. Расчетные уровни 1% обеспеченности снижаются на 60 см, средние многолетние уровни – примерно на 30 см.

Значительный вклад в аномальный рост уровня озера Ханка дает переброска стока р. Мулинхэ в бассейн озера Малая Ханка и затем в озеро Ханка по системе каналов, емкостей и регулирующих гидротехнических сооружений. Переброска осуществляется в целях борьбы с наводнениями в низовьях р. Мулинхэ и для обеспечения водой рисовых оросительных систем. Результаты модельных расчетов показывают, что при реализации данной схемы существенно возрастают и среднее значение уровня, и среднеквадратическое отклонение, и в целом раз-

Табл. 4. Результаты динамико-стохастического моделирования уровня воды в оз. Ханка для различных вариантов расчета

Параметры распределения уровня	Варианты (в соответствии с Табл. 3)			
	1	2	3	4
Средний уровень озера, м	68,75	69,02	69,24	69,77
Коэффициент асимметрии, C_s	0,26	0,18	0,14	0,17
Среднее квадратическое отклонение, σ	0,54	0,52	0,85	0,82
Коэффициент автокорреляции, $r(1)$	0,84	0,85	0,85	0,86
Средний расход р. Сунгач, Q, м^3/с	54,9	54,7	69,1	68,6

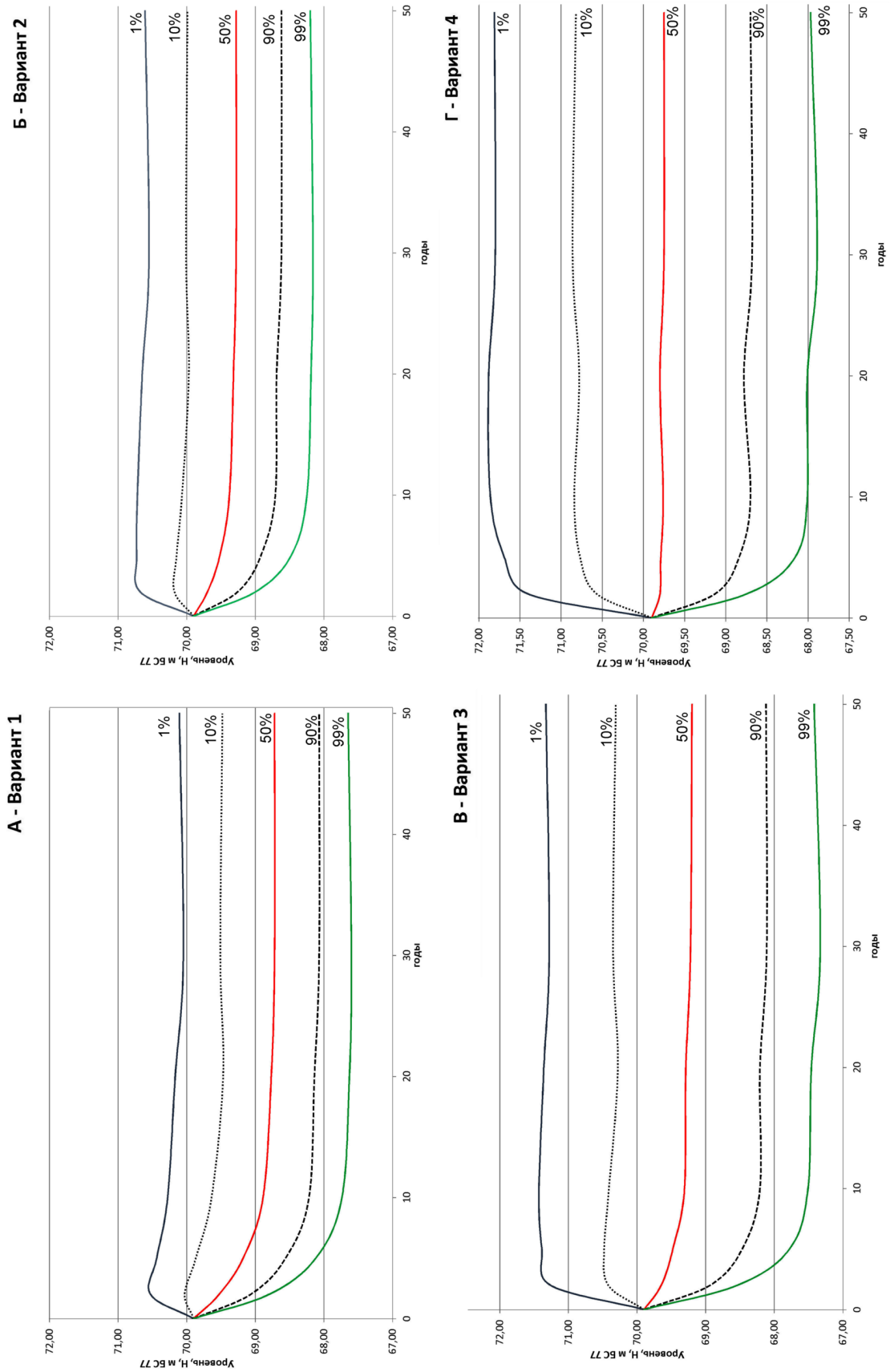

Рис. 12. Вероятностный прогноз уровня озера Ханка в виде доверительных интервалов различной обеспеченности для различных вариантов водопользования: А – вариант 1, Б – вариант 2, В – вариант 3, Г – вариант 4.

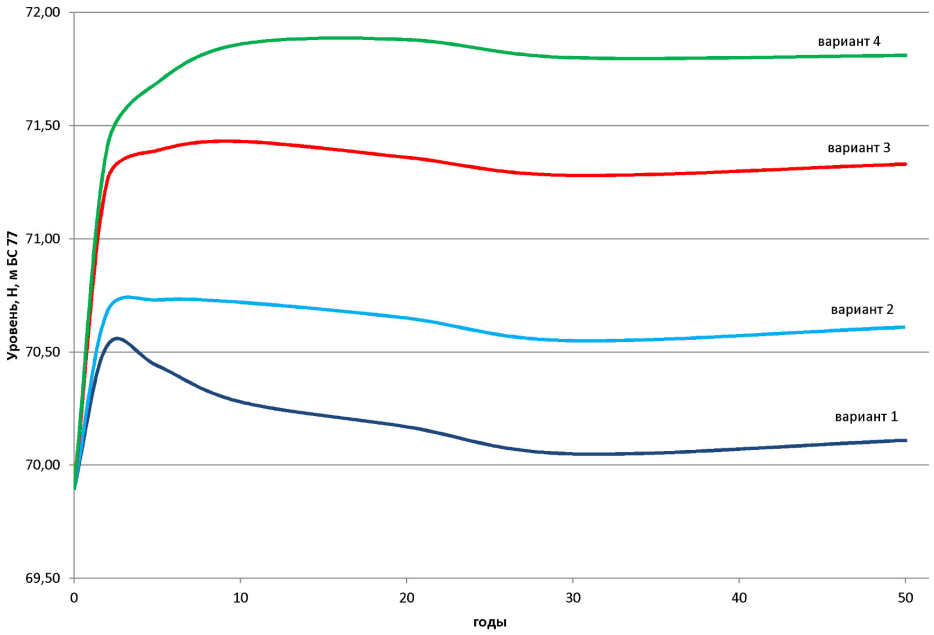

Рис. 13. Прогнозное значение уровня с вероятностью 1% при различной заблаговременности прогноза для разных сценариев водопользования.

мах колебаний уровня становится больше. Максимальные уровни обеспеченностью 1% могут отличаться для разных сценарных вариантов на величину до одного метра. Сокращение дополнительного сброса паводочных вод в озеро и перенаправление части паводочного стока непосредственно в р. Сунгача существенно снизит максимальные уровни воды в озере.

Один из вариантов регулирования озера заключается в развитии орошения в бассейне и в росте величин безвозвратных потерь. Рост таких потерь до 0,5 км^3 в год позволит существенно понизить уровень воды, но это мероприятие может быть реализовано в полном объеме лишь в отдаленной перспективе.

Ответ же на вопрос, вынесенный в заглавие статьи,

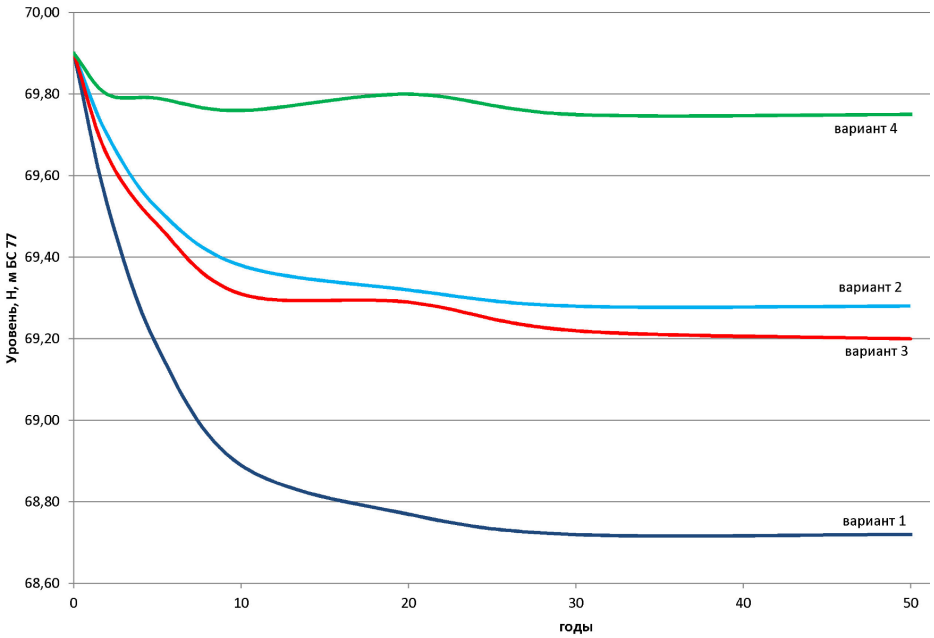

Рис. 14. Среднее значение прогнозного уровня с вероятнгостью 50% для разных сценариев водопользования.

состоит в том, что современный подъем уровня воды в озере Ханка является результатом сложного взаимодействия естественных и антропогенных факторов – повышенной водности впадающих рек и значительных объемов перебрасываемого стока из бассейна р. Мулинхэ.

Благодарности. Автор выражает признательность д.г.н. В. Ю. Георгиевскому и ведущему научному сотруднику, к.г.н. А. Л. Шалыгину (Государственный гидрологический институт Росгидромета) за конструктивное обсуждение проблемы прогнозирования и управления уровенным режимом озера Ханка, а также сотрудникам ГГИ и Приморского УГМС, выполнившим комплекс полевых работ и обобщение имеющихся в данном регионе результатов гидрометеорологических наблюдений, использованных в данной работе для динамико-стохастического моделирования уровенного режима озера Ханка. Сведения об использовании водных ресурсов на китайской части бассейна собраны автором в мае 2016 г. в рамках программы обмена визитами российских и китайских экспертов на трансграничные водные объекты.

Литература

Багров, Н. А. (1959), Аналитическое представление последовательностей метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих, *Труды ЦИП*, *74*, 3–27.

Баканов, К. Г. (1988), Аналитическое представление последовательностей метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих, ИВП АН СССР, Москва. (дисс. канд. техн. наук)

Болгов, М. В. (1994), Моделирование многомерных гидрологических характеристик методом разложения по естественным ортогональным функциям, *Метеорология и гидрология*, No. 7, 82–95.

Бортин, Н. Н., А. М. Горчаков (2016), Причины экстремально высокого уровня воды трансграничного озера Ханка, *Водное хозяйство России, проблемы, технологии, управление*, No. 4, 62–85.

Васьковский, М. Г. (1978), *Гидрологический режим озера Ханка*, 175 pp., Гидрометеоиздат, Ленинград.

Крицкий, С. Н., М. Ф. Менкель (1946), Некоторые положения теории колебания уровней естественных водоемов в их применении к исследованию режима Каспийского моря, *Труды первого совещания по регулированию стока* p. 52–67, АН СССР, Москва.

Отчет о НИР (2016), *Научные исследования по изучению гидрологических особенностей водного режима озера Ханка в целях определения причин аномального повышения уровня воды и выработки научно-обоснованных предложений по регулированию уровня воды в озере, формированию комплекса мер по снижению негативного воздействия вод озера на территории Приморского края. Этап 1: "Оценка основных элементов водного баланса озера Ханка и анализ особенностей их формирования" (промежуточный)*, 296 pp., ФГБУ "ГГИ", СПб.

Сарманов, О. В. (1961), Исследование стационарных Марковских процессов методом разложения по собственным функциям, *Труды МИАН*, *60*, 238–261.

Свешников, А. А. (1968), *Прикладные методы теории случайных функций*, 460 pp., Наука, Москва.

Тихонов, В. И., М. А. Миронов (1977), *Марковские процессы*, 488 pp., Советское радио, Москва.

Фаддеев, Д. К., В. Н. Фаддеева (1963), *Вычислительные методы линейной алгебры*, 734 pp., Физматгиз, Москва.

М. В. Болгов, Институт водных проблем РАН, Москва, Россия. (bolgovmv@mail.ru)