


Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



оз. Малая Ханка  
оз. Ханка

# ВОДНЫЙ БАЛАНС ОЗЕРА ХАНКА

И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ  
ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРИРОДНЫХ  
И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Под редакцией д-ра. геогр. наук

В. Ю. Георгиевского

Камень-Рыболов

Спасск-Дальний

Санкт-Петербург

2022

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

**Водный баланс озера Ханка  
и его изменения под влиянием природных  
и антропогенных факторов**

Под редакцией  
д-ра. геогр. наук В. Ю. Георгиевского

Санкт-Петербург  
2022

УДК 556.555  
ББК 26.222.02

**Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов** / Под ред. д-ра. геогр. наук В. Ю. Георгиевского – СПб.: Государственный гидрологический институт. – 272 с.

В коллективной монографии представлены современные сведения о морфометрических характеристиках оз. Ханка, пропускной способности р. Сунгач и водоотводящих каналов, полученные на основе результатов, проведенных гидролого-гидрографических экспедиционных работ. Приведены результаты анализа развития в последние десятилетия комплексной водохозяйственной системы на китайской части бассейна озера и сопредельной территории. На основе полученных данных о водном балансе оз. Ханка за 1949–2015 гг., анализа естественных и антропогенных факторов, определяющих изменчивость его составляющих, представлены научно обоснованные выводы о причинах многолетних изменений уровня воды озера, дана количественная оценка вклада гидрометеорологических факторов и хозяйственной деятельности в современное повышение уровня. Приводятся результаты вероятностного прогноза уровня оз. Ханка на перспективу нескольких десятилетий при различных сценариях гидрометеорологических условий и развития водохозяйственной деятельности в бассейне. Обоснованы первоочередные мероприятия по регулированию уровня воды оз. Ханка, направленные, прежде всего, на его снижение, включающие расчистку русла Сунгачинского канала, реконструкцию сбросного участка Сунгачинского и Александровского каналов, а также периодическую расчистку прибрежного бара на приустьевом участке р. Сунгач.

Результаты, представленные в монографии, могут быть использованы при реализации мероприятий по снижению негативных последствий современного повышения уровня воды оз. Ханка. Научно-методические подходы, реализованные в работе, могут найти применение при исследованиях водного режима других озер страны.

**ISBN 978-5-907682-20-7**

**УДК 556.555  
ББК 26.222.02**

© Государственный Гидрологический институт, 2022  
© Издание, оформление: ООО«РИАЛ», 2022

## Предисловие

В монографии представлены результаты исследований, выполненных в рамках работ по реализации федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 гг.» по теме «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 территорию Приморского края».

Исследования выполнены коллективом специалистов ФГБУ «ГГИ», ФГБУ «Приморское УГМС», Дальневосточного центра ФГБУ «НИЦ Планета», ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУ «ИВП РАН».

Для озера Ханка характерны многолетние циклические колебания уровня воды, в результате которых площадь водной поверхности озера и объем воды в нем существенно изменяются. Регулярные наблюдения за уровнем воды были начаты в 1912 г. В течение предыдущего столетия среднегодовые уровни изменялись в пределах 2-х метрового диапазона и жизнедеятельность на прибрежных территориях была приспособлена к таким его колебаниям. Однако, с 2000 г. началось повышение уровня, в результате которого в 2013 г. он превысил исторический максимум и продолжал повышаться вплоть до 2016 г. В последующие годы уровень оставался на высоких отметках.

Повышение уровня озера привело к затоплению и подтоплению жилой застройки населенных пунктов, объектов инфраструктуры, сельскохозяйственных земель, размыву защитных дамб и насыпей, затоплению значительной части территории Ханкайского природного заповедника, имеющего международный статус биосферного резервата ЮНЕСКО.

Для проведения мероприятий по обеспечению безопасной жизнедеятельности населения в прибрежной зоне и эффективного ее экономического использования первоочередной задачей является выявление причин экстремального повышения уровня озера. Изменение уровня (объема воды) оз. Ханка зависит от соотношения поступления воды в озеро и её расходования, которые в свою очередь определяются гидрометеорологическими факторами в его бассейне, а также факторами хозяйственной деятельности. В связи с этим, очевидно, что объективное выявление причин современного повышения уровня оз. Ханка должно базироваться на результатах количественной оценки и научного анализа его водного баланса. К сожалению, исследования водного баланса оз. Ханка не проводились с начала 1980-х годов. Необходимо отметить значительный вклад М. Г. Васильковского в развитие этого направления и его фундаментальную монографию «Гидрологический режим озера Ханка» (1978 г.). Последний погодичный водный баланс озера составлен в Приморском УГМС

и опубликован в издании Государственного водного кадастра «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (1986 г.).

Для исследования особенностей формирования водного баланса озера и количественной оценки его составляющих в современных условиях потребовалось выполнение комплекса инженерных гидролого-гидрографических работ по уточнению морфометрических характеристик озера и оценке пропускной способности р. Сунгач и водоотводящих каналов, проведенных специалистами Приморского УГМС и Государственного гидрологического института летом 2016 г. Самостоятельной и важной проблемой являлось объективная оценка ситуации с использованием и распределением воды на китайской части бассейна оз. Ханка, где к концу 1990-х годов была создана крупнейшая комплексная водохозяйственная система, включающая гидротехнические сооружения, оросительные и мелиоративные каналы, каналы переброски стока, крупные рисовые оросительные массивы. Основное назначение этой системы – отведение паводковых вод р. Мулинхэ для защиты густонаселённых районов в нижнем течении реки от наводнений с дальнейшим использованием вод для орошения рисовых систем, расположенных в бассейне оз. Ханка. Поскольку надёжные количественные данные по характеристикам водохозяйственной инфраструктуры и использованию воды на китайской территории практически отсутствуют, оценка влияния этих мероприятий на водный баланс и уровень озера была выполнена на основе научного анализа космических снимков высокого разрешения, а также материалов натуральных обследований, выполненных российскими специалистами в рамках проведения на территории КНР VII-го заседания Рабочей группы по управлению водными ресурсами Совместного Российско-Китайской комиссией по рациональному использованию и охране трансграничных вод (июнь 2016 г.).

Информация, полученная в результате экспедиционных работ, дешифрирования космических снимков, наряду с многолетними данными гидрометеорологическими наблюдениями на станциях Росгидромета, послужила основой проведения теоретических исследований причин современного повышения уровня оз. Ханка и возможных вариантов его регулирования.

Авторы выражают искреннюю благодарность своим коллегам из Приморского УГМС: Цуриковой Т. В., Соколову А. А., Рыбалко С. В., Сергеевой И. В., Микуленко М. Н., Кожевниковой З. Д., Фадеевой В. В., Троценко Е. Н., Чичкиной Т. А., Сорокиной Н. П., выполнившим подготовку и анализ гидрометеорологической информации по бассейну озера за весь период наблюдений. Следует отметить их большой вклад в проведении комплексных полевых рекогносцировочных, инженерно-гидрологических и морфометрических работ, позволивших получить современную информацию об озере и его прибрежной территории, наличии и состоянии гидротехнических сооружений, пропускной способности р. Сунгач и водоотводящих каналов.

Авторы искренне признательны начальнику Приморского УГМС Кубаю Б. В. за поддержку и внимание к работе по проведению исследований.

## 1. Общая характеристика озера и его бассейна

Озеро Ханка – самое крупное озеро Дальнего Востока принадлежит к водосборному бассейну р. Амур и расположено на границе Приморского края Российской Федерации и провинции Хэйлунцзян Китайской Народной Республики (*рисунок 1.1*).

Озеро Ханка находится в средней части Западно-Приморской равнины, вытянувшейся в меридиональном направлении. На северо-востоке равнина продолжается в пределах КНР, а на юго-западе она ограничена северными отрогами Борисовского базальтового плато. Длина ее с юго-запада на северо-восток (до низовья р. Бикин) составляет около 470 км, наибольшая ширина – около 150 км. К равнине примыкает ряд межгорных впадин. Западно-Приморская равнина в пределах России подразделяется на три района [1], [2] на юге расположена Раздольнинская равнина, в центральной части – Приханкайская, а на северо-востоке – Нижнебикинская равнина. Бассейн оз. Ханка расположен в пределах Приханкайской равнины, Хорольского



Рисунок 1.1 – Бассейн озера Ханка

низкогорья, северной части Раздольнинской равнины и окружающего эти равнины горного обрамления (на западе – окраина Восточно-Маньчжурского нагорья, на востоке – отроги Сихотэ-Алиня).

По характеру поверхности, климатическим условиям, почвам и растительности бассейн оз. Ханка резко отличается от других районов Приморья. Поверхность его представляет сложное сочетание древних озерно-аллювиальных и денудационно-делювиальных равнин, разделенных невысокими останцовыми возвышенностями, а с запада и востока окруженных высокими горными массивами. Водораздельная линия бассейна проходит от истока р. Сунгач на юго-восток по плоской поверхности Приханкайской равнины, затем на востоке по отрогам и вершинам гор пересекает Синий хребет (верховье р. Спасовки, наибольшая высота 1074 м); на юго-востоке она проходит по отрогам Сихотэ-Алиня (верховье р. Иистой, наибольшая высота 906 м), а затем круто поворачивает на северо-запад, пересекает северную часть Раздольнинской равнины (по междуречью между Раздольной и Абрамовкой и в западной части бассейна проходит по осевой части Пограничного хребта (окраина Восточно-Маньчжурского нагорья, наибольшая высота 984 м). В пределах КНР водораздел озера пересекает плоскую поверхность Приханкайской равнины южнее левых притоков р. Сунгач. Общая площадь водосбора оз. Ханка (без зеркала озера), составляла 16890 км<sup>2</sup>, в том числе на территории России 15370 км<sup>2</sup>.

Сведения о реках, образующих бассейн озера, приведены в *таблице 1.1*.

*Таблица 1.1*

Реки бассейна оз. Ханка

Реки	Длина, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>
На территории России		15370
Спасовка (Сантахеза)	83	1260
Илистая (Лефу)	220	5470
Мельгуновка (Мо)	67	3510
Комиссаровка (Синтухэ)	111	2310
Большие Усачи	46	304
Тур	19	181
Прочие (9 водотоков и междуречья)		2340
На территории КНР		1520
Тур	19	41,5
4 реки, впадающие в оз. Ханка		415
5 рек, впадающих в оз. Малая Ханка		926
Акватория оз. Малая Ханка		140
Всего		16890

Как следует из *таблицы 1.1*, значительная часть водосбора в пределах КНР относится к бассейну оз. Малая Ханка, отделенного от основного водоема узкой песчаной косой. В настоящее время водообмен между озерами Ханка и Малая Ханка регулируется тремя напорными ГТС на территории КНР.

Река Сунгач – единственный естественный водоток, по которому осуществляется сток из оз. Ханка. Река вытекает из северо-восточной части озера и впадает в р. Усури на 450 км от ее устья. Протяженность ее составляет 212 км. Площадь водосбора в устье оценивается в 25600 км<sup>2</sup>, в том числе в пределах РФ – 21000 км<sup>2</sup>. Коэффициент извилистости русла составляет 2,4, а ширина его изменяется в пределах 35–40 м. Река протекает по присунгачской низменности – сильно заболоченной низине со следами ее древних русел. При уровне воды в озере 70 м БС77 и выше верхняя часть этой низменности покрывается водой.

Река имеет два основных притока, впадающих в нее с правого берега – р. Белая (на 151 км от устья), р. Черная (на 72 км от устья), а также несколько небольших левобережных притоков, стекающих с китайской территории.

На побережье озера Ханка, а также в верхнем и среднем течении р. Сунгач расположен Ханкайский государственный природный заповедник. Заповедник учрежден 28 декабря 1990 года Постановлением СМ РСФСР № 616. Цель создания заповедника – охрана мест массового гнездования, пролета и зимовок птиц, охрана фауны гидробионтов оз. Ханка, растений, млекопитающих и пресмыкающихся. В административно-территориальном отношении заповедник занимает территории Ханкайского, Хорольского, Черниговского, Спасского, Кировского и Лесозаводского муниципальных районов. Общая площадь заповедника составляет 114798,6 га.

Заповедник состоит из 5 участков, четыре из которых находятся на побережье оз. Ханка, один – в верхнем и среднем течении р. Сунгач (*рисунок 1.2*).

Участок «Сосновый» (375 га) – находится на западном побережье оз. Ханка и включает в себя остров Сосновый и часть территории землепользования совхоза «Авангард» (в районе устья р. Комиссаровка), а также залив Мал. Ханкайчик и бухту Тихая; участок «Мельгуновский» (300 га) – расположен в районе с. Старая Девица и включает остров Василевский, часть территории землепользования совхоза «Новодевичанский», правый берег р. Мельгуновки; участок «Речной» (12494 га) – находится на южном берегу озера Ханка в дельте р. Илистая; участки «Журавлиный» (9479 га) и «Чертово болото» (16641 га) – находятся в долине р. Сунгач.

Ханкайский государственный природный заповедник имеет международный статус биосферного резервата ЮНЕСКО с 2005 г. Заповедник включает часть водно-болотного угодья международного значения «Озеро Ханка» (Рамсарская «Конвенция о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение, главным образом, в качестве местообитаний водоплавающих птиц»).

Вокруг заповедника выделены охранные зоны, общей площадью 73743 га.



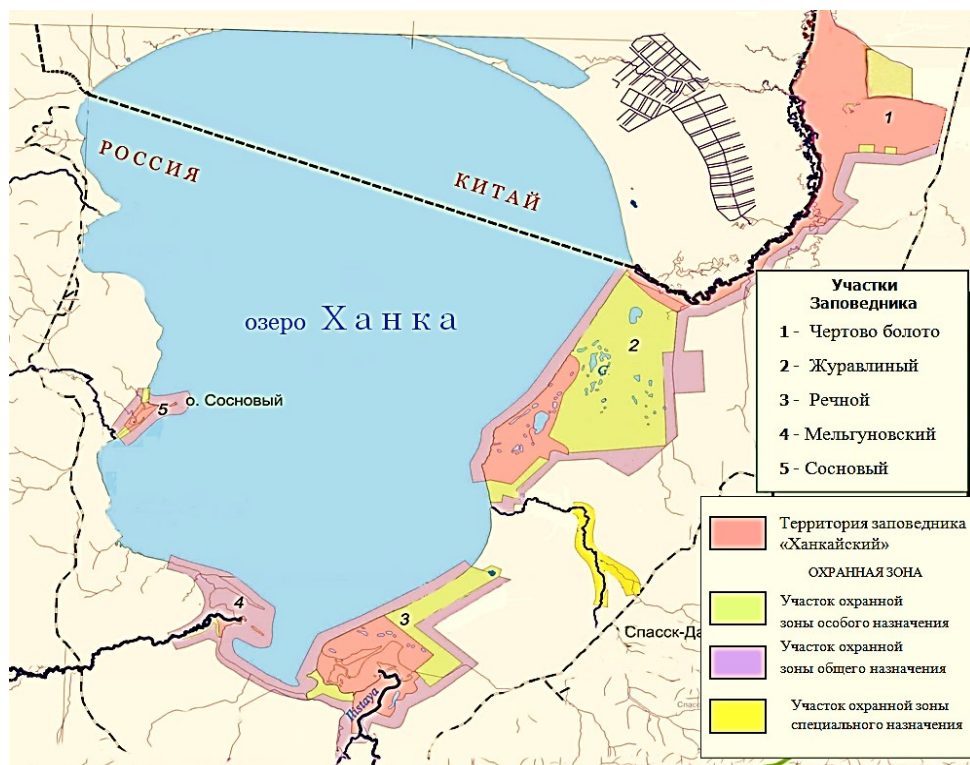


Рисунок 1.2 – Карта–схема государственного природного заповедника «Ханкайский»

Общая площадь водной поверхности оз. Ханка при среднем многолетнем уровне за 1912–2015 гг. составляет 4070 км<sup>2</sup>, в том числе в пределах России 3030 км<sup>2</sup> – без учета оз. Малая Ханка (КНР), а также озер-лагун Тростниковое (площадь 22,8 км<sup>2</sup>), Протока (5,37 км<sup>2</sup>) и Крылово (1,35 км<sup>2</sup>). Общая площадь этих озер-лагунов, соединенных с оз. Ханка протоками (проливами), составляет 29,5 км<sup>2</sup>, или всего 0,7% площади озера. Площадь поверхности озера непостоянна, она изменяется в зависимости от уровня от 3940 до 5010 км<sup>2</sup>. Объем водной массы озера при уровне 68,90 БС (за 1949–2015 гг.) составляет 18,3 км<sup>3</sup> (при среднем многолетнем уровне за 1912–2015 гг.), изменяясь в зависимости от уровня от 12,7 до 24,8 км<sup>3</sup>.

В плане озеро имеет грушевидную форму с наибольшим расширением в северной части. Наибольшая длина озера составляет 90 км, максимальная ширина – 67 км. Самая южная часть озера (от устья р. Мельгуновки на западном берегу до м. Спасского на восточном) представляет по существу большой залив, отделенный от остальной акватории озера мелководным гребнем (древняя дельта р. Мельгуновки). Котловина озера имеет тектоническое происхождение (синклиальный прогиб на погруженном Ханкайском кристаллическом щите). Дно озера сравнительно ровное, с очень пологим наклоном в сторону наибольших глубин, достигающих 5–6,5 м.

По форме и рельефу дна котловину озера можно разделить на две части: верхнюю (до глубины 3 м) – имеющую полуэллипсоидальную форму, и нижнюю – имеющую параболоидальную форму.

Береговая линия озера имеет длину 308 км при среднем многолетнем уровне. Развитие или изрезанность ее определяется морфологическим типом берега: на участках аккумулятивных берегов она менее расчленена, чем на участках абразионных берегов. Аккумулятивные берега занимают около 85% общей длины береговой линии, они распространены вдоль всего восточного побережья, где к озеру прилегает древняя верхнечетвертичная равнина, а также на юго-западном и западном побережье. Значительно меньшее распространение имеют абразионные берега, приуроченные к зоне останцово-денудационного рельефа.

В пределах аккумулятивных берегов отмечаются далеко вдающиеся в озеро выступы, представляющие собой древние и современные дельты рек. Такой выступ расположен севернее устья р. Спасовки (м. Лебединый), он совпадает с древней дельтой этой реки. В устье р. Мельгуновки аккумулятивный выступ, образованный современными речными наносами, вытянут в восточном направлении. Несколько севернее расположен второй песчаный выступ, находящийся на продолжении древнего русла этой реки. При низком уровне воды в озере длина этого узкого песчаного полуострова, вытянувшегося в юго-восточном направлении, составляет около 6 км (в высокую воду он совершенно затапливается или превращается в ряд разобщенных песчаных островков).

Значительный выступ из песчано-гравийного материала расположен несколько севернее современного устья р. Комиссаровки, отчлененная оконечность которого известна под названием о. Соснового. Выступ представляет собой древнюю дельту этой реки; он вытянут в северо-восточном направлении соответственно простиранию долины р. Комиссаровки в ее нижнем течении.

Абразионные берега распространены на западном побережье от с. Турий Рог до м. Платоновского и от устья р. Комиссаровки до с. Астраханка. Высокие абразионные уступы выработаны здесь в слаболитифицированных песчано-галечных и песчано-глинистых отложениях плиоцена или сильно выветренных палеозойских гранитах. В южной части озера выделяется далеко выступающий полуостров – Сопка Лузанова, в береговых уступах которого обнажаются мезозойские эффузивные породы. В пределах абразионных берегов выделяются значительные по своим размерам заливы Платоновский и Лузанова.

Западный и юго-западный берега озера преимущественно возвышенные, на отдельных участках спускаются к урезу воды крутыми уступами или скалистыми утесами. Высота их колеблется от 6–15 до 30–40 м над средним уровнем озера. На участках, где берега сложены слаболитифицированными песчано-глинистыми отложениями, хорошо развита сеть глубоких оврагов, и заметны следы небольших

оползней. Восточный и юго-восточный берега низкие (1–1,2 м), пологие, часто заболоченные. На отдельных участках, начинаясь непосредственно от уреза воды или отделяясь от него небольшой песчаной пересыпью (береговым валом), располагаются плавни из зарослей тростника, дикого риса, аира и других влаголюбивых растений. Особенно это характерно для юго-восточной части побережья (район озер–лагунов Тростникового и Протоки), где прилегающее приозерье представляет собой крупнотравяное (тростниковое) болото, затопленное водой. На отдельных участках береговая линия здесь выделяется лишь небольшими сплавинами из торфа, покрытого сверху сухим тростником. Вдоль восточного побережья развита значительная зона мелководья с серией подводных и надводных береговых валов. Образование подводных береговых валов обусловлено здесь интенсивным вдольбереговым перемещением наносов. На наличие мощного потока наносов вдоль восточного побережья указывает образование песчаного бара в истоке р. Сунгач и образование перешейка в северной части озера, отделившего в недалеком прошлом оз. Малая Ханка от основного водоема [1].

## 2. Многолетние колебания уровня озера Ханка и его влияние на социально-экономические условия прибрежных территорий

Многолетние колебания среднегодовых уровней воды озера характеризуются последовательной сменой фаз их повышения и понижения различной продолжительности (рисунок 2.1). В XX столетии наиболее высокие уровни наблюдались в 1915, 1939, 1975 и 1995 гг. и достигали отметок 69,10–69,35 м БС77, а низкие в 1925, 1954 и 1980 гг. при отметках 67,35–67,54 м БС77.

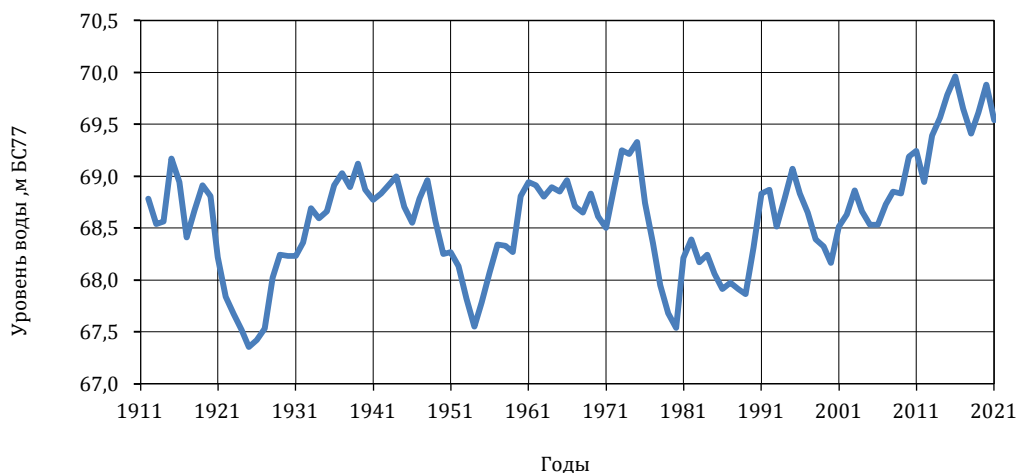


Рисунок 2.1 – Среднегодовые уровни озера Ханка за 1912–2021 гг.

С 2000 г. началась очередная фаза повышения уровня, в 2013 г. среднегодовой уровень превысил исторический максимум и составил 69,39 м, а в 2016 г. достиг отметки 69,96 м. В последующие годы уровень сохранялся на высоких отметках. Вышние в году средние суточные уровни воды, начиная с 2013 г., систематически превышали отметку 70,0 м (рисунок 2.2).

Внутригодовая амплитуда среднесуточных значений уровня, оцененная по данным двухсрочных наблюдений как разница между наименьшим и наибольшим уровнями в году, за период с 1946 г. составила более 1,5 м.

К вышеописанным внутригодовым колебаниям уровня следует добавить подъемы уровня, связанные с ветровыми нагонами, которые в районе с. Астраханка могут достигать 1,5 м, у с. Турий Рог – 1,1 м, а у Сопки Лузанова – 1,6 м.

Из вышесказанного следует, что в периоды высокого стояния уровня воды в озере могут наблюдаться дополнительные непродолжительные повышения уровня: в течение месяца до 30-50 см выше среднегодового значения; в короткие периоды ветрового нагона – свыше 120 см выше среднегодового уровня.

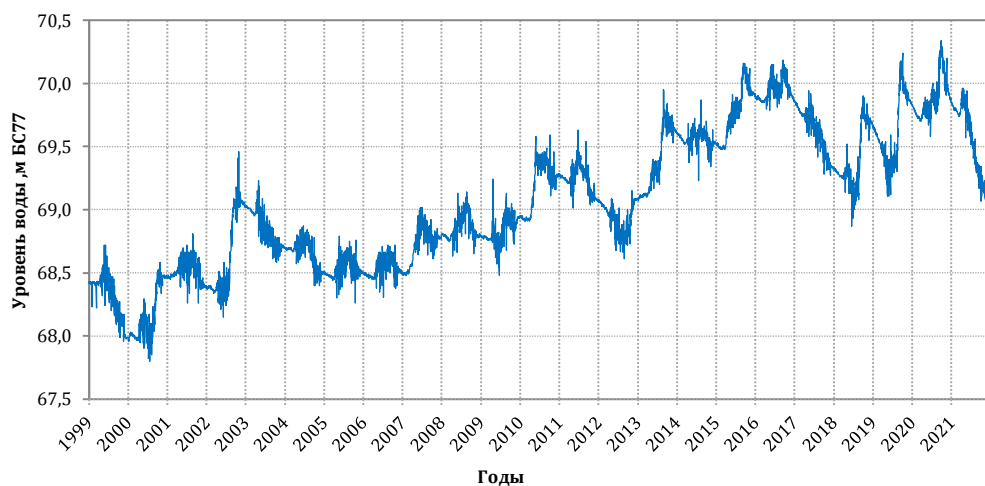


Рисунок 2.2 – Среднесуточные уровни озера Ханка за 1999–2021 гг.

Последствия продолжительных стояний высокого уровня воды в озере (трансгрессий) известны. Прежде всего, это затопление низких территорий, прилежащих к восточному и северо-восточному берегам озера. В соответствии с уточненной морфометрической кривой озера, при повышении уровня озера на 1 м выше отметки 69,0 м БС77 площадь водной поверхности увеличивается на значительную величину – 15 %, что приводит к затоплению поселков, рисовых чеков, особо охраняемых угодий, в частности территории Государственного природного заповедника Ханкайский. Кроме того, в периоды высокого стояния уровня воды идет активное размывание низменных торфяных берегов и переотложение органического вещества. В дополнение к вышесказанному впадающие реки выносят в озеро (в приустьевые участки) большое количество рыхлого материала. Подъему уровня озера соответствует активная аккумуляция наносов в речных долинах.

Последствия краткосрочных повышений уровня, связанных с ветровыми нагонами, проявляются, прежде всего, в размывании берегов. Ветровые нагоны в районе низких восточных берегов озера приводят к переливанию воды озера через береговую бровку.

Значительный вред экологии и экономике региона наносят и продолжительные низкие стояния уровня воды озера – регрессии. Несмотря на то, что площадь озера при понижении уровня на 1 м от отметки 69,0 м уменьшается всего на 5 %, а при отметке 67,0 м еще на 3,5 %, объем воды в мелководном озере уменьшается катастрофически: от 20 до 26 % объема на каждый метр снижения уровня. В периоды регрессии усиливается процесс эвтрофикации озера, происходит деградация водно-болотных угодий, резко (в 5–10 раз) снижается численность гнездящихся птиц и успешность размножения загнездившихся.

С учетом вышесказанного, очевидна необходимость поддержания уровня озера в наиболее благоприятном диапазоне, как для проживания и хозяйственной деятельности населения бассейна, так и для сохранения природы самого озера и Приханкайской низменности.

Повышение уровня озера в начале настоящего столетия послужило причиной целого комплекса негативных последствий на российской части бассейна озера Ханка в трех муниципальных районах, граничащих с озером – Ханкайском, Хорольском и Спасском в том числе:

- затопления и подтопления жилых (нежилых) строений со всей их инфраструктурой (сарай, огороды, погреба, выгребные ямы, колодцы и т.п.), линий электропередач и подстанций, пахотных земель, пастбищ и сенокосов, дорожной инфраструктуры (полотно дороги, придорожные канавы, водопропускные сооружения), пирсов, причалов и мостов, рисовых оросительных мелиоративных систем и прочее;

- усиления процессов разрушения берегов и прибрежной полосы волновыми нагонами и прибоем, а также воздействием переносимого водой обломочного материала;

- размыва защитных дамб и насыпей в результате переливов воды и фильтрации;

- активизации процессов переноса песка и органических остатков нагонными волнами и прибоем и, как следствие, замыв прибрежных территорий этими продуктами;

- увеличения амплитуды денивеляционных процессов, в результате увеличения объема озера;

- ухудшения экологической и эпидемиологической ситуации в связи с затоплением и подтоплением прибрежных территорий, на которых находятся: места хранения промышленных и бытовых отходов, удобрений и ядохимикатов, нефтепродуктов, очистные сооружения, скотомогильники, кладбища и т.п., и как следствие, попадание загрязняющих веществ и болезнетворных бактерий в оз. Ханка, р. Сунгач и ее притоки;

- поступления в озеро большого количества продуктов разрушения берегов в результате волнового воздействия и прибоя, что существенно увеличивает мутность воды, негативно сказываясь на работе водозаборных сооружений;

- поднятия уровня грунтовых вод в зоне их выклинивания по берегам озера, что [3] [4] негативно сказывается на подземных коммуникациях и фундаментах промышленных и жилых строений;

- уменьшения площадей песчаных и гравийных пляжей на западном побережье оз. Ханка;

- изоляции большинства туристических баз и кордонов в Спасском и Ханкайском районах, отрезанных водой от дорог;

– нарушения нормальной управленческой и научной деятельности администрации Ханкайского государственного природного заповедника (международный статус биосферного резервата ЮНЕСКО с 2005 г.), в связи с затоплением практически всей его низинной части.

Для оценки негативных социально-экономических последствий, наблюдавшихся в этих районах, в июне 2016 г. были выполнены полевые обследования пострадавших территорий, а также проанализирована информация, полученная от муниципальных объединений о последствиях современного повышения уровня воды в озере. Дополнительно были использованы комические снимки затопленных участков.

Первое упоминание о наличии случаев затопления у с. Новосельское (Спасский район) относится к 2013 г., когда среднегодовой уровень воды в озере достиг отметки 69,39 м БС77. Превышение над средним многолетним уровнем в этом году составило 0,95 м. По мере продолжающегося подъема уровня воды увеличивались и размеры территорий, подвергающихся подтоплению и затоплению. Так, к июню 2016 г. (при среднегодовом уровне в этом году равным 69,96 м БС77) площадь затопления прибрежной зоны российской части озера возросла до 812 км<sup>2</sup>. При этом ширина полосы затопления согласно [5] изменялась от нескольких десятков метров до 10 км.

В Ханкайском районе пострадали жилые и хозяйственные постройки в населенных пунктах Турий Рог, Новокачалинск, Платоно-Александровское, Астраханка, Камень-Рыболов, частично затоплены сельскохозяйственные земли, в том числе рисовые оросительные системы (РОС), большинство туристических баз на побережье озера. Подмыт участок железной дороги на участке Платоно-Александровское – с. Новокачалинск, где происходит разрушение насыпи и железнодорожного полотна. По побережью и на устьевых участках рек, впадающих в оз. Ханка происходит интенсивное переформирование берегов, пляжи уничтожены. По данным администрации затоплено 5000 га земель сельскохозяйственного назначения (пахотные земли) и 3000 га пастбищ и сенокосов. Пострадало 74 дома, из которых 6 домов разрушено, частично подмыто 68 жилых домов. Деформация по ширине береговой полосы (обрушение) составила до 15 м.

На *рисунках 2.3–2.5* представлены фотографии наблюдавшихся негативных последствий в этом районе.

На территории Хорольского района современное повышение уровня воды озера привело к затоплению и подтоплению сельскохозяйственных угодий, зон рекреации, мелиоративных каналов, дорог, расположенных в прибрежной зоне. В населенном пункте Сиваковка образовались промывы в дамбе обвалования и наблюдались переливы через нее. На территории Ханкайского государственного природного заповедника практически полностью затоплены участки «Мельгуновский» и «Речной». На *рисунках 2.6–2.8* представлены фотографии наблюдавшихся негативных последствий в Хорольском районе.



*Рисунок 2.3 – Разрушенный пирс базы отдыха в с. Новокачалинск*



*Рисунок 2.4 – Размыв берега у жилых домов по ул. Набережная в с. Новокачалинск*





*Рисунок 2.5 – Часть смытой железнодорожной насыпи на побережье озера, между Новокачалинском и Платоно-Александровским*



*Рисунок 2.6 – Затопленный Сиваковский магистральный канал*



*Рисунок 2.7 – Размыв дамбы обвалования в с. Сиваковка*



*Рисунок 2.8 – Затопленный участок Ханкайского государственного природного заповедника*

В Спасском районе вследствие повышения уровня озера у с. Новосельское неоднократно возникали чрезвычайные ситуации в связи с затоплением жилых

построек и улиц, размывом дамб обвалования р. Спасовка. Систематическому затоплению неоднократно подвергались сельскохозяйственные угодья, мелиоративные зоны. На территории Ханкайского государственного природного заповедника практически полностью затоплен участок «Журавлиный». На *рисунках 2.9–2.10* представлены фотографии наблюдавшихся негативных последствий в данном районе.



*Рисунок 2.9* – Подтопленные жилые и хозяйственные постройки в с. Новосельское



*Рисунок 2.10* – Затопленные строения на участке от мыса Спасский до истока р. Сунгач

На карте-схеме (рисунк 2.11) приведена зона затопления и виды основных негативных воздействий на территориях Ханкайского, Хорольского и Спасского муниципальных районов. Детально объекты и виды негативного воздействия представлены в таблице 2.1.



Рисунок 2.11 – Карта-схема зоны затопления и видов негативного воздействия в результате современного повышения уровня оз. Ханка

Таблица 2.1

Объекты и виды негативного воздействия в результате современного повышения уровня оз. Ханка на территориях муниципальных районов

Населенный пункт, участок побережья	Объект негативного воздействия	Виды негативного воздействия
Ханкайский муниципальный район		
с. Турий Рог	жилые здания, хозяйственные постройки, дороги, зоны рекреации	- затоплен пляж площадью 5 га, шириной вдоль побережья оз. Ханка 50 м; - размыта и заилена проезжая часть по ул. Набережная, подъезд к 19 домам невозможен, - нагонные волны доходят до заборов и фундаментов жилых домов и надворных построек, в которых проживают 67 жителей, из них 7 детей.

Населенный пункт, участок побережья	Объект негативного воздействия	Виды негативного воздействия
с. Новокачалинск	берег озера, жилые здания, хозяйственные постройки, зоны рекреации	<ul style="list-style-type: none"> <li>- затоплен пляж площадью 14 га, шириной вдоль побережья оз. Ханка 50 м, примыкающий к селу от устья р. Малые Усачи до устья р. Большие Усачи;</li> <li>- частично разрушены из-за обрушения берега 5 шестиквартирных домов барачного типа по ул. Набережная, в которых зарегистрировано 59 человек, из них 10 детей. В отдельно стоящих жилых домах разрушены водой заборы, хозяйственные постройки, налицо угроза самим домам.</li> </ul>
с. Платоно-Александровское	берег озера, жилые здания, хозяйственные постройки, железная дорога	<ul style="list-style-type: none"> <li>- на 4х участках железной дороги по направлению на с. Турий Рог (пикеты 121, 122, 123, 124), общей протяженностью около 700 м, подмыта насыпь земляного полотна, берега разрушены, водоотводы замты песком, состояние путей близкое к аварийному.</li> <li>- в результате нагонных волн по ул. Пограничной вода подтапливает заборы 5 домов (проживает 15 человек) с хозяйственными постройками, представляя угрозу самим зданиям.</li> </ul>
с. Астраханка	берег озера, жилые здания, хозяйственные постройки, дороги, зоны рекреации	<ul style="list-style-type: none"> <li>- в районе метеостанции «Озерная» на значительном протяжении подмыта и обрушилась береговая полоса шириной 20 м, смыто в озеро 2 складских помещения, площадью до 50 м кв. каждое. Проведенное, в 2014 г., метеостанцией укрепление береговой полосы шлакоблочно-бетонными конструкциями на 50 % разрушено, проводятся дополнительные работы;</li> <li>- по улице Набережная, из-за обрушения берега часть деревьев упала в озеро, уровень воды находится в 10 м от жилых домов.</li> <li>- при нагонном ветре волны озера заливают заборы на высоту до 0,5 м, часть дороги и надворные постройки разрушены и смыты, нагонные волны подмывают стены домов. На этом участке расположено 20 домов, в которых зарегистрировано 68 человек (60 взрослых жителей и 8 детей);</li> <li>- на территории баз отдыха «Ханка», «Пионер», «Пионер-2» пляжная зона шириной 50 м находится под водой, разрушено бетонное укрепление берега, протяженностью 1,4 км. Под угрозой разрушения 8 построек, общей площадью 260 кв. м.</li> </ul>

Населенный пункт, участок побережья	Объект негативного воздействия	Виды негативного воздействия
с. Камень-Рыболов	берег озера, жилые здания, хозяйственные постройки, зоны рекреации	- на ул. Решетникова, смыто огородов – 8 га, пострадало 22 жилых дома с приусадебными участками и надворными постройками. Количество проживающих 67 человек; - затоплен пляж от с. Камень-Рыболов до с. Астраханка площадью 20 га, шириной вдоль побережья оз. Ханка 50 м;
Хорольский муниципальный район		
с. Сиваковка	Сиваковская дамба обвалования	- перелив через дамбу и промыв земляного полотна дамбы
участок побережья от устья р. Мельгуновка до устья р. Илистая	зоны рекреации, сельскохозяйственные угодья, мелиоративные каналы, дороги	- затоплены зоны рекреации; - затоплены сельскохозяйственные угодья; - затоплены мелиоративные каналы; - затоплены дороги.
Участки «Мельгуновский», «Речной» Ханкайского государственного природного заказника	особо охраняемые природные территории (ООПТ)	- затоплены почти полностью участки «Мельгуновский», «Речной»
Спасский муниципальный район		
с. Новосельское	дамба обвалования; муниципальные дороги;	- размыв Левобережной (на участке до 200 м) и Правобережной дамб обвалования, и, как следствие, частичное затопление и подтопление с. Новосельское; - с 2013 г., в связи с затоплением и подтоплением с. Новосельское, 7 раз возникала муниципальная чрезвычайная ситуация; - в 2015 г. подтопленными оказались 15 домов, а затопленными – 14 домов. Были нарушены условия жизни 69 человек; - при нагонных явлениях поднимается уровень воды в р. Спасовка и затопливается дорога по улицам Нагорная, Центральная, Набережная.
прибрежная зона	зоны рекреации, сельскохозяйственные угодья, мелиоративные каналы, дороги, ООПТ	- затоплены зоны рекреации; - затоплены и не используются свыше 6 тыс. га с/х угодий, в том числе РОС; - затоплены мелиоративные каналы; - затоплены дороги, - затоплены ООПТ

### 3. Климатические условия бассейна озера Ханка

#### 3.1 Факторы, определяющие климатический режим в Южном Приморье и в бассейне озера

Бассейн озера Ханка, включающий обширную Приханкайскую низменность, расположенную на границе с провинцией Хэйлунцзян Китайской Народной Республики (КНР), относится к Южному Приморью. Климатический режим этого района определяется радиационным балансом, особенностями циркуляционного режима и рельефом местности. Хотя район расположен между 47° и 44° с.ш., количество солнечной радиации, приходящей в летние месяцы, значительно меньше по сравнению с теми же широтами на ЕТР и в Западной Европе. Большая повторяемость пасмурных дней в летнее время, обусловленная влиянием летнего муссона, снижает приход солнечной радиации не менее чем на 15–20 %, что наиболее существенно сказывается на термическом режиме. Преобладание в зимнее время континентального умеренного воздуха, поступающего в бассейн озера с ветрами северных направлений, определяет более низкие температуры воздуха в зимний период по сравнению с регионами, расположенными на тех же широтах на ЕТР.

Наряду с радиационными и циркуляционными факторами, рельеф местности оказывает значительное влияние на климатические условия внутренних районов. Водораздельные хребты, на западе отроги Восточно-Маньчжурского нагорья, на востоке отроги Сихотэ-Алинского горного хребта, частично задерживают влажные воздушные потоки, приносящие муссонные осадки на Приханкайскую низменность в летнее время. Зимой же холодные и сухие воздушные массы, приходящие из внутренних районов материка, где господствует Сибирский антициклон, беспрепятственно проникают в район озера.

Котловина озера расположена почти в центральной части Уссурийско-Ханкайской низменности. С севера она ограничена невысоким Самурским хребтом, который подходит вплотную к пойме реки Уссури близ границы Приморского и Хабаровского краев. Уссурийско-Ханкайская или Приханкайская равнина – самая большая низменность Приморского края и занимает около 20 % его площади. Остальные 4/5 территории Приморского края заняты хребтами горной страны Сихотэ-Алинь, протянувшейся с северо-востока на юго-запад. Хребет Сихотэ-Алинь состоит из многочисленных горных гряд, переплетающихся между собой, и отдельных возвышенностей и простирается вдоль побережья Японского моря. Наивысшие вершины хребта гора Аник – 1933 м, Облачная – 1855 м, Высокая – 1746 м, Снежная – 1684 м. По характеру рельефа Приморский край – в основном горная страна.

С запада Приханкайская равнина ограничена отрогами Восточно-Маньчжурской горной страны. На юге равнина, соединяясь с долиной реки Суйфун (Раздольная), протягивается далеко на юг к заливу Петра Великого. С востока и юго-востока

Приханкайская равнина окаймляется многочисленными отрогами хребтов Сихотэ-Алиня. Эти отроги расчленяют равнину на ряд низменных участков по притокам Уссури и вдоль ее русла.

Котловину озера окаймляют низкогорья и небольшие возвышенности, редко превышающие 200–300 м. Наиболее высоким является Хорольское нагорье, проходящее в широтном направлении через всю равнину между бассейном озера Ханка и рекой Суйфун. Хорольское нагорье имеет высоту от 240 до 370 м и разделяет равнину на две неравные части: северную – Приханкайско-Уссурийскую и южную – Присуйфунскую.

К юго-западу от озерной котловины на границе с КНР расположен невысокий горный массив (Хасано-Гродековские горы), который является отрогом Восточно-Маньчжурских гор. Горные гряды Хасано-Гродековской горной области имеют волнистые очертания. Средние высоты гряд составляют 400–500 м, и только отдельные вершины достигают 800 и более метров. На северо-западе этого горного образования расположен хребет Пограничный, который оказывает значительное влияние на режим осадков в бассейне озера. Во время летнего муссона влажный воздух, поступающий из залива Петра Великого, поднимается вдоль этого горного хребта и приносит обильные осадки. Единственное предложение, где орография связана с климатом.

Дальний Восток в силу своего географического положения находится к зоне, где климатические условия в значительной степени определяются особенностями циркуляционного режима. Регион расположен на северной границе умеренной муссонной циркуляции. Муссонная циркуляция имеет хорошо выраженный сезонный ход, в летнее время, когда суша нагрета сильнее по сравнению с океаном, преобладающие ветры направлены с моря на сушу, в результате влажные массы воздуха перемещаются на континент, принося обильные осадки, зимой ситуации изменяется на обратную.

В формировании муссона умеренных широт главную роль играет контраст температуры и давления над сушей и морем, в результате чего образуются сезонные центры действия атмосферы: зимний максимум давления (известный как Сибирский антициклон) и летняя депрессия. Определенное влияние на муссонную циркуляцию оказывает состояние Алеутского минимума давления и Тихоокеанского максимума, стационарные центры действия атмосферы на Тихом океане.

В зимний сезон в Приамурье и прилегающих областях режим осадков определяется циклонической деятельностью, которая развивается на периферии Сибирского антициклона. В летнее время, когда над континентом преобладает область пониженного давления (летняя депрессия), циклоническая деятельность перемещается на материк, депрессия заполняется влажным морским воздухом, который приносит обильные осадки на Дальний Восток и Приамурье. Обычно сезон дождей начинается с конца июня и продолжается до середины сентября.



Необходимо отметить, что климат Южного Приморья и района оз. Ханка отличается от классического муссонного климата юго-восточной Азии, Индии и западной Африки. Если изучению климата этих областей, определяющему условия жизни многомиллионного населения этих стран, посвящено большое количество исследований, то условия образования и развития муссона умеренных широт, влияющего на климат Дальнего Востока РФ, изучены относительно слабо.

Первое описание муссонной циркуляции в умеренной зоне Восточной Азии принадлежит А. И. Воейкову в конце XIX столетия. Более детальное описание циркуляционных процессов на Дальнем Востоке было сделано в конце 50-х годов прошлого столетия в работе А. А. Заниной [6].

Выделяют две стадии летнего муссона: во время первой стадии муссона (май – июнь) осадки выпадают чаще всего в виде моросящих дождей [6]. Эти месяцы отличаются большим количеством облачности и обилием туманов. Районы южного Приморья недополучают солнечную радиацию из-за большой повторяемости облачности, в результате чего температура воздуха оказывается значительно ниже, чем температуры воздуха на тех же широтах в западных районах РФ. Наиболее ярко черты климата «холодной» стадии муссона проявляются на побережье южного Приморья. Из-за экранирующего влияния Сихотэ-Алинского хребта относительно холодные и влажные воздушные массы не поступают на Приканкайскую низменность и в район озера.

Во время второй стадии муссона в район Приморья начинает поступать теплый и влажный воздух из южных районов (в отдельные годы даже из тропических широт) Тихого океана. Частично этот влажный и теплый воздух задерживается горными хребтами Сихотэ-Алиня, расположенными практически параллельно береговой линии побережья, но часть этого влажного потока достигает района озера Ханка, где основное количество осадков выпадает в летние месяцы (июль – август). Эти воздушные массы морского умеренного (севернее 40° с.ш.) и морского тропического (южнее 40° с.ш.) воздуха формируют осадки второй стадии летнего муссона.

Основными центрами действия атмосферы (ЦДА), под влиянием которых формируется климат южного Приморья и бассейна озера Ханка, в зимнее время являются сибирский сезонный максимум и алеутский минимум (*рисунок 3.1*), летом – азиатский сезонный минимум и область высокого давления в Тихом океане – гавайский антициклон (*рисунок 3.2*).

В зимний период основным элементом структуры термобарического поля тропосферы над Дальним Востоком является обширная и устойчивая ложбина на восточном побережье азиатского континента. Крупномасштабная тропосферная ложбина формируется из небольших высотных ложбин, перемещающихся с запада и северо-запада. По мере приближения к побережью эти барические образования чаще всего углубляются и замедляют свое движение. Зимний азиатский антициклон

бывает особенно устойчив и обширен тогда, когда над Сибирью развивается высотный гребень. В таких случаях на юг Приморья могут выходить лишь неглубокие ныряющие циклоны, в большинстве случаев небольшие по размерам, которые быстро проходят, вызывая кратковременные ухудшения погоды.

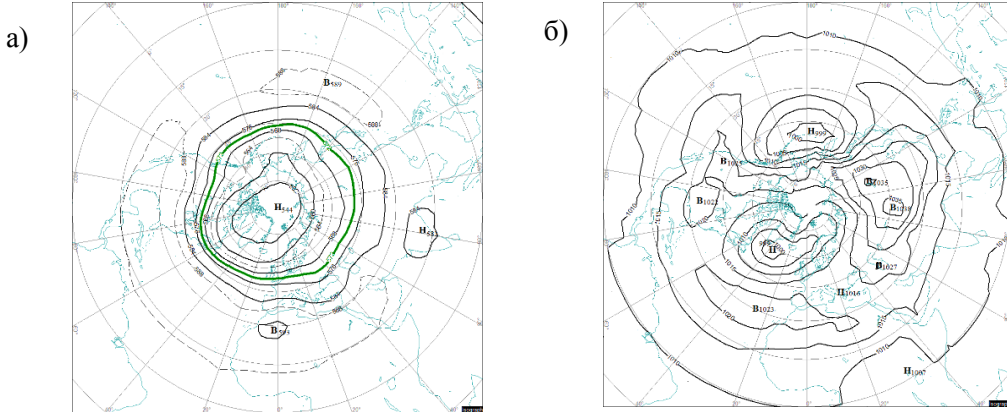


Рисунок 3.1 – Климатическое поле геопотенциала  $H_{500}$  (а) и поля приземного давления (б) в январе (зеленым цветом обозначено климатическое положение высотной фронтальной зоны)

В теплое время года (рисунок 3.2) в том районе, где зимой обычно находится глубокая ложбина, летом чаще всего располагается высотный гребень.

Основная дальневосточная высотная ложбина в это время ориентирована от полюса на Берингово море и в южной ее части нередко формируется самостоятельная высотная депрессия. По северной периферии этой депрессии часто перемещаются высотные антициклоны, выходящие со стороны Аляски. Входя в систему дальневосточного гребня, они усиливают его, увеличивают его меридиональную протяжённость и делают малоподвижным.

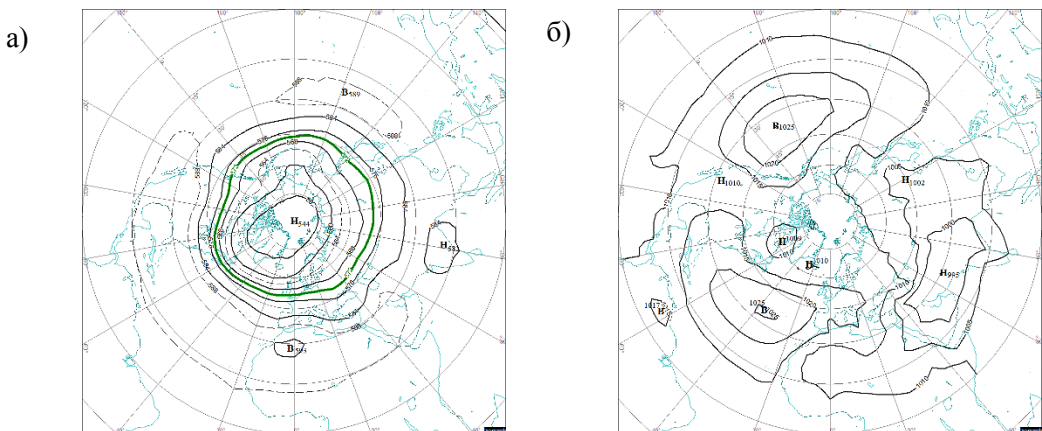


Рисунок 3.2 – Климатическое поле геопотенциала  $H_{500}$  (а) и поля приземного давления (б) в июле (зеленым цветом обозначено климатическое положение высотной фронтальной зоны)

При отсутствии устойчивого высотного гребня над востоком Азии восстанавливается зональный перенос воздушных масс, и амурские циклоны формируются гораздо чаще, смещаясь затем на восток. Но поскольку горизонтальные градиенты температуры и давления летом невелики, циклоны эти не имеют условий для развития. Активизация летней циклонической деятельности в Приморье происходит в том случае, когда высотный гребень устанавливается не у западного побережья Охотского моря, а над Камчаткой, и высотная ложбина из Сибири смещается в Якутию и в бассейн Амура. Если эта ложбина распространяется далеко к югу (до 30–35° с.ш.), то на Японское море и Приморье начинают выходить интенсивные южные циклоны, а иногда и экс-тайфуны, с очень сильными дождями и штормовыми или ураганскими ветрами.

В конце лета и осенью преобладает зональный перенос, что способствует быстрому перемещению на восток небольших высотных ложбин и гребней. При этом в широтной зоне 30–50° с.ш. осенью, также, как и весной, происходит частое перемещение западных антициклонов, сопровождающихся сухой и солнечной погодой. Осенние циклоны, по мере охлаждения континента, становятся все более интенсивными, адвекция холода в их тылах все более продолжительной, и у восточного побережья Азии все чаще появляются глубокие высотные ложбины. В связи с этим Планетарная высотная фронтальная зона (ПВФЗ) смещается к югу, и процессы постепенно приобретают зимний характер.

В зимний период основным элементом структуры термобарического поля тропосферы над Дальним Востоком является обширная и устойчивая ложбина на восточном побережье азиатского континента. Крупномасштабная тропосферная ложбина формируется из небольших высотных ложбин, перемещающихся с запада и северо-запада. По мере приближения к побережью они обычно углубляются и замедляются. Если по западной периферии ложбины усиливается адвекция холода, то она в результате распространяется на восточное побережье Китая и Желтое море, и над дальневосточными морями начинается активный циклогенез. Этот процесс приводит к дальнейшему углублению высотной ложбины и превращению ее в стационарное барическое образование у восточного побережья Азии. Бассейн Амура при этом находится под влиянием тыловой части ложбины, где создаются условия, благоприятные для антициклогенеза.

Если крупномасштабный высотный гребень отсутствует над континентальными районами Дальнего Востока, то активизируется циклоническая деятельность. Антициклон при этом смещается к югу и ослабевает, из его системы происходит выделение ядер, которые смещаются на восток через Китай и Японию. Зональный перенос восстанавливается, и западные циклоны получают возможность двигаться на Дальний Восток, в том числе и на Приморье. Циклоны, перемещающиеся через бассейн Амура к востоку или северо-востоку, выражены лучше, чем ныряющие

циклоны как в барическом поле, так и в поле других метеоэлементов. Обычно прохождение таких циклонов сопровождается резкими колебаниями температуры, усилением северо-западного ветра, плотной многоярусной облачностью и осадками, выпадающими не только в горных, но и в равнинных районах Приморья.

Если же прохождение циклона через бассейн Амура сопровождается распространением высотной ложбины на восточный Китай и Желтое море, то, как правило, начинается активный циклогенез над южными районами Дальнего Востока. В районе, включающем в себя Восточно-Китайское и Желтое моря, большую часть Японского моря и Японии, с ноября по март ежемесячно образуются 8–9 (а иногда и 13) южных циклонов, с которыми обычно связаны наиболее неблагоприятные погодные условия, в первую очередь сильные осадки и штормовые ветры.

В течение весны происходит постепенное ослабление высотной дальневосточной ложбины. Заметно возрастает повторяемость зональных процессов, при которых высотные ложбины и гребни небольшой длины и амплитуды быстро смещаются на восток. Периоды циклонической погоды при этом часто сменяются непродолжительными антициклональными вторжениями, которые происходят по довольно разнообразным траекториям. Однако уже в мае некоторые слабые и подвижные гребни при выходе на Дальний Восток часто начинают усиливаться и замедляться.

Дальнейшее развитие этот процесс получает в летние месяцы. В тех районах, где зимой обычно располагалась глубокая ложбина, летом чаще всего находится высотный гребень. Основная дальневосточная высотная ложбина в это время ориентирована от полюса на Берингово море и в южной её части нередко формируется самостоятельная высотная депрессия. По северной периферии этой депрессии часто перемещаются высотные антициклоны со стороны Аляски. Входя в систему дальневосточного гребня, они усиливают его, увеличивают его меридиональную протяжённость и делают малоподвижным.

Таким образом, происходит блокирование зонального переноса и раздвоение ПВФЗ умеренных широт. Одна её ветвь огибает высотный гребень с севера, вторая проходит примерно по 45° с.ш. Соответственно, одни западные циклоны идут на Якутию и северное побережье Азии, другие – на северо-восточный Китай и бассейн Амура, где, часто стационарируя, формируют летнюю дальневосточную депрессию. Эта депрессия, как правило, малоподвижна, хотя иногда отдельные циклоны выходят из её системы и перемещаются через Приморье к Курильским островам. При отсутствии устойчивого высотного гребня над востоком Азии восстанавливается зональный перенос воздушных масс, и амурские циклоны формируются гораздо чаще, смещаясь затем на восток. Но поскольку горизонтальные градиенты температуры и давления летом невелики, циклоны эти не имеют условий для развития. Настоящая же активизация летней циклонической деятельности в Приморье происходит в том случае, когда высотный гребень устанавливается не у западного

побережья Охотского моря, а над Камчаткой, и высотная ложбина из Сибири смещается в Якутию и в бассейн Амура. Если эта ложбина распространяется далеко к югу (до 30–35° с.ш.), то на Японское море и Приморье начинают выходить интенсивные южные циклоны, а иногда и экс-тайфуны, с очень сильными дождями и штормовыми или ураганскими ветрами.

Северо-западная часть Тихого океана является районом наиболее активного тропического циклогенеза в северном полушарии. Ежегодно здесь возникает в среднем более 25 тропических циклонов [7], из которых значительная часть выходит на побережья Индокитая, Юго-Восточной и Восточной Азии и на Японские острова. Вероятность образования тропического циклона (ТЦ) на северо-западе Тихого океана достаточно велика с апреля по декабрь, однако на территории Приморья их влияние ощущается в основном в июле-сентябре (*таблица 3.1*). Выходы тропических и экс-тропических циклонов в июне и октябре бывают чрезвычайно редки, а поздней осенью, зимой и весной их не бывает вовсе.

*Таблица 3.1*

Число выходов ТЦ (1) и повторяемость (2), оказавших влияние на Приморье за период 1970–2011 гг.

Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Год	
1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
8	0,19	12	0,29	5	0,12	2	0,05	27	0,65

*Таблица 3.2* составлена по данным «Банка тропических циклонов» Гидрометцентра России за период 1970–2011 гг. [7]. Среднее количество циклонов, прямо или косвенно влияющих на Приморье, составляет 0,65 в год, т.е. один циклон в 1–2 года.

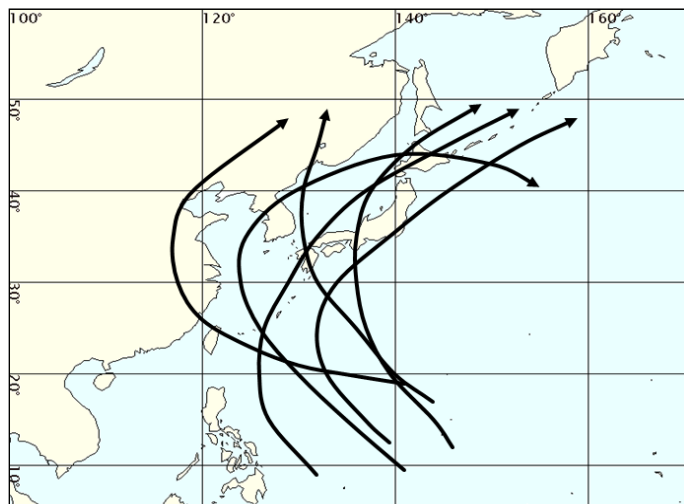
Аналогичные данные (*таблица 3.2*), полученные японской метеослужбой (ЖМА) за период 1951–2015 гг. [8], показывают примерно такой же результат. Около половины этих циклонов оказывают влияние на осадки Приханкайской равнины и в бассейне озера Ханка.

*Таблица 3.2*

Число тропических циклонов, оказавших влияние на бассейн оз. Ханка за период 1951–2015 гг. (по данным ЖМА)

Стадия циклона	Косвенное влияние			Прохождение над оз. Ханка		
	Всего	ТЦ	экс-ТЦ	Всего	ТЦ	экс-ТЦ
Число	52	14	38	16	4	12
Повторяемость	0,8	0,2	0,6	0,3	0,1	0,2

Типичные траектории движения тропических циклонов, приносящих обильные осадки в Южное Приморье представлены на *рисунке 3.3*.



*Рисунок 3.3* – Типичные траектории тропических циклонов, которые оказывают влияние на осадки Южного Приморья

Наиболее опасными для Южного Приморья являются тропические циклоны, выходящие в Восточно-Китайское, Желтое и Японское моря. Иногда до Приморья могут доходить циклоны, вышедшие на восток Китая, если они быстро поворачивают на северо-восток, не углубляясь на сушу.

Тихоокеанские тайфуны обычно достигают максимальной глубины над океаном у 20° с.ш., продвигаясь к северу, происходит их заполнение, особенно быстрое при их выходе на сушу. К району Южного Приморья (к широте 40–45° с.ш.) циклоны подходят уже с давлением в центре 990–1000 мб.

Особо интенсивные осадки на территории Приморского края вызывают, как правило, прямо или косвенно влияющие тайфуны и экс-тайфуны (90 % случаев), при выходе их в район между 38° и 47° с. ш. и 130° и 137° в. д. При этом обычно наблюдается активное вторжение холодных воздушных масс из Восточной Сибири или даже из Арктики, которые проникают вплоть до Центрального и даже Южного Китая. В 10% случаев особо интенсивные осадки могут быть обусловлены южными циклонами. При выходе южных циклонов максимальное количество осадков выпадает в южных районах Приморского края. На Приханкайской равнине и в предгорьях Сихотэ-Алиня повторяемость очень сильных дождей составляет 5–6 случаев за 10 лет.

Как уже отмечалось, климат Приморья относится к муссонному климату, главной особенностью которого является смена преобладающих направлений ветра от зимы к лету и от лета к зиме на противоположное. На *рисунке 3.4* показаны повторяемости преобладающих направлений ветра на территории Восточной Азии.

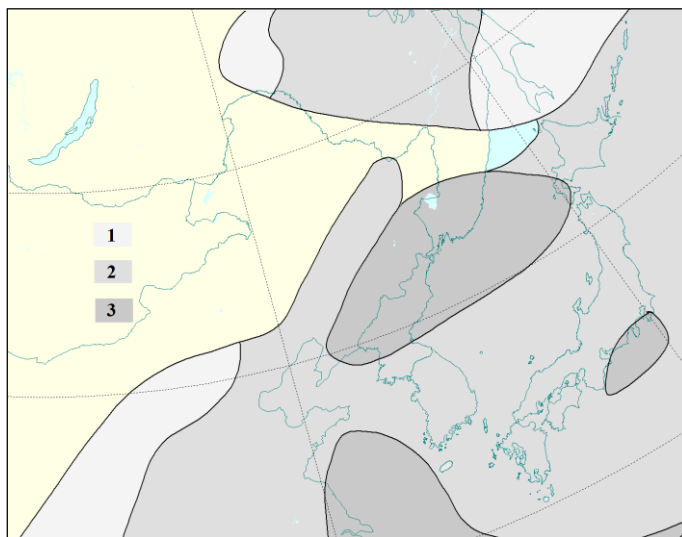


Рисунок 3.4 – Распределение муссонных областей. Повторяемость преобладающих направлений ветров 1 – менее 40 %, 2 – 40–60 %, 3 – более 60 %

Из рисунка 3.4 видно, что Приханкайская равнина расположена в области субтропических муссонов. Северные и южные границы этой области совпадают, в основном, с летним и зимним положением полярного фронта в этом регионе. Устойчивость субтропических муссонов довольно велика: на прибрежных станциях она может достигать 70 %. С продвижением вглубь континента устойчивость муссона уменьшается до 40–60 %. На юге Приморья средняя повторяемость преобладающих направлений ветра превышает 60 %. Зимой это ветры северной четверти, связанные с восточной периферией сибирского антициклона. На Приханкайской равнине самыми сильными бывают, как правило, северо-западные ветры.

### 3.2 Термический режим Приханкайской низменности и района озера Ханка

Для анализа климатических условий в бассейне оз. Ханка использовались данные о месячных температурах и суммах осадков по 10 метеорологическим станциям (таблица 3.3), расположенным в бассейне озера, и 11 станциям, находящимся на сопредельных территориях.

На рисунке 3.5 представлены среднегодовая, летняя и зимняя температуры воздуха за период с 1950 по 2015 гг., осредненные по 10 станциям в пределах бассейна озера. Среднегодовая температура изменялась незначительно и в отдельные годы составляла от 2 до 5°C. Летняя температура в этот же период изменялась в пределах 17–20°C. Зимняя температура имеет большую межгодовую изменчивость

и изменяется от  $-19^{\circ}\text{C}$  в начале периода наблюдений до  $-11^{\circ}\text{C}$  в начале 2000-х. Начиная с 80-х годов прошлого столетия отмечается тенденция к увеличению как абсолютных значений зимней температуры воздуха, так и ее изменчивости, что также проявляется и в некотором увеличении среднегодовой температуры.

Тренды температуры воздуха в среднем за год и по сезонам для всего бассейна озера представлены в *таблице 3.4*. Тренды среднегодовой и летней температуры положительны и значимы на 95% уровне, тренды зимней температуры слабо отрицательные и статистически незначимые.

Таблица 3.4

Метеостанции, расположенные в пределах бассейна оз. Ханка

Индекс станции	Градусы северной широты	Градусы восточной Долготы	Высота станции	Название станции	Часть бассейна
31913	45.2	132.0	92	Турий Рог	западая
31921	44.7	132.1	74	Астраханка	западая
31923	44.8	132.8	72	Новосельское	восточная
31915	44.4	131.4	217	Пограничный	западная
31924	44.4	132.1	126	Хороль	южная
31926	44.6	132.8	108	Спаск-Дальний	восточная
31928	44.3	132.4	113	Халкидон	южная
31931	44.9	133.1	99	Свягино	восточная
5238	44.8	131.6		Дворянка, пост	западная
5239	44.9	131.9		Ильинка	западная

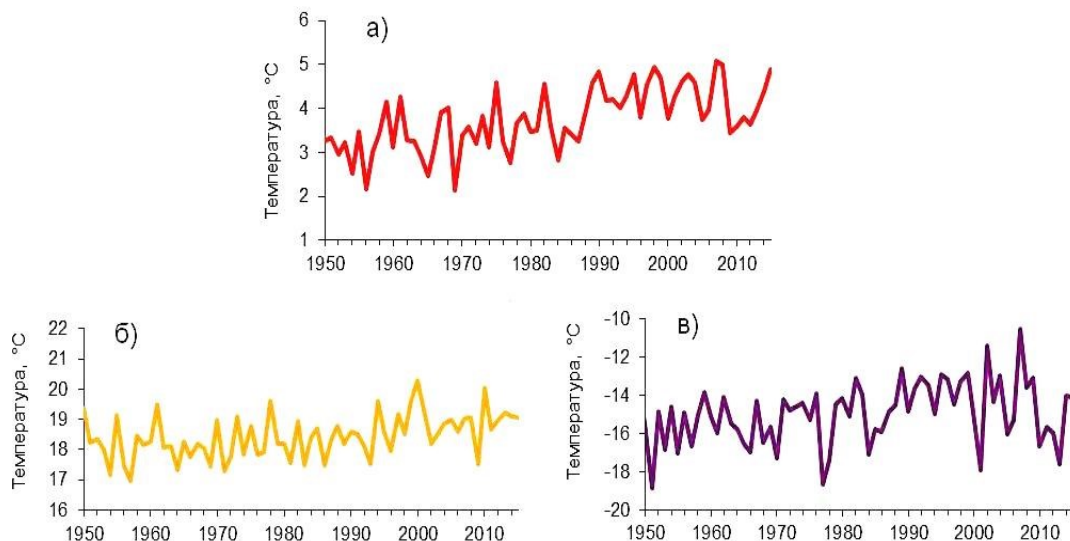


Рисунок 3.5 – Среднегодовая (а), летняя (июнь–сентябрь) (б) и зимняя (декабрь–февраль) (в) температуры воздуха, осредненные по всем станциям в пределах бассейна оз. Ханка



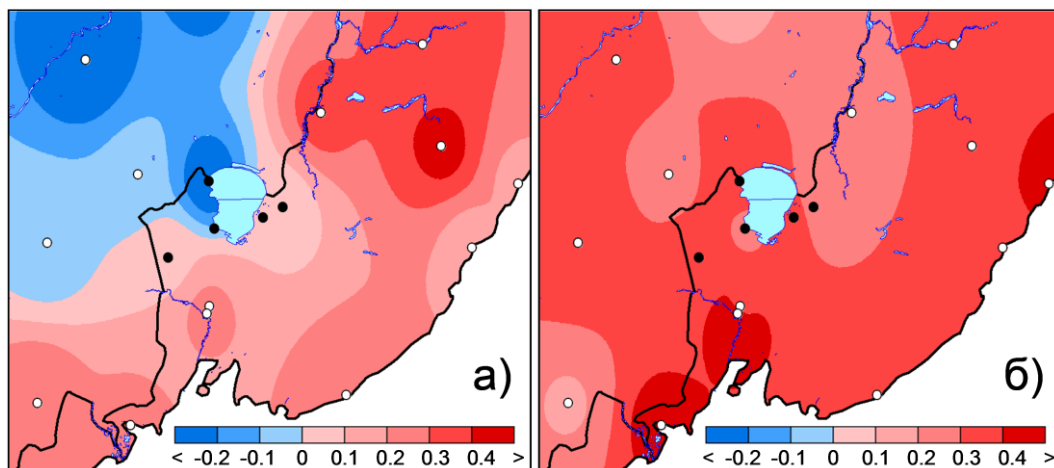
Тренды температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) за период 1981–2015 гг.

Индекс станции	Год	Теплый период	Холодный период	Октябрь-май	Станция
31913	<b>0,39</b>	<b>0,34</b>	-0,27	0,21	Турий Рог
31921	<b>0,15</b>	<b>0,28</b>	-0,04	0,08	Астраханка
31923	<b>0,22</b>	<b>0,35</b>	0,03	0,14	Новосельское
31915	0,17	<b>0,33</b>	0,05	0,13	Пограничный
31931	0,14	<b>0,24</b>	0,06	0,15	Свягино

Примечание: Жирным шрифтом выделены тренды, статистически значимые на 95% уровне

На *рисунке 3.6* представлены карты пространственного распределения трендов температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) за период с 1981–2015 гг. в бассейне оз. Ханка и сопредельных территориях за летний (июнь–сентябрь) и зимний (декабрь–февраль) периоды. Как видно из рисунка, тренды летней температуры положительны для всех станций бассейна озера и прилегающей территории. Наиболее значительное потепление отмечается в южной части Приморья, в районе действия муссона.

Зимой картина более неоднородная, западная часть бассейна находится в области отрицательных трендов, восточная и южная – в области слабо отрицательных трендов. Наиболее значительное потепление зимой отмечается вне бассейна озера на востоке в Приамурье.



*Рисунок 3.6* – Тренды температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) за период 1981–2015 гг. для зимнего (а) и летнего (б) периодов. Точками обозначены метеорологические станции, черные точки – станции в пределах бассейна озера

Анализ данных о температуре воздуха позволяет сделать вывод об уникальном характере климата Приханкайской равнины и бассейна оз. Ханка, который сочетает черты муссонного климата южного Приморья и континентального климата Восточной Сибири. Низменность расположена на северной границе летнего муссона умеренных широт и районы, находящиеся даже на сравнительно близком расстоянии друг от друга, отличаются по температурному режиму. Летняя температура в бассейне реки Усури значительно ниже, чем в бассейне р. Сунгари.

Лето в Приханкайской низменности и в районе оз. Ханка теплое, с температурой воздуха около 20–21°C. По сравнению с Южным Приморьем, где относительная влажность в летние месяцы очень высокая (от 70 до 82 % и выше), Приханкайская низменность отличается сухостью воздуха, причем наиболее низкая относительная влажность характерна для западного побережья озера (район Гродеково) [1]. Юго-западные районы Приханкайской низменности наиболее благоприятны для сельского хозяйства. Сочетание таких факторов как относительно высокая влажность воздуха и сравнительно высокая летняя температура позволяет возделывать такие культуры как рис и соя.

Зимой климат бассейна озера носит ярко выраженные черты, характерные для антициклонического режима, с большим количеством ясных дней, низкой влажностью и температурой воздуха. Средняя температура января изменяется от -17°C до -21°C, абсолютные минимумы температуры могут опускаться ниже -40°C. Устойчивый снежный покров образуется в третьей декаде ноября. Максимальная его высота достигает 30 см, снежный покров сохраняется 100–130 дней, снеготаяние в западной части Приханкайской низменности происходит в середине марта, в восточной части позднее.

Осень в районе озера Ханка сухая, достаточно теплая с температурой воздуха в сентябре до 13–15°C, в начале октября начинаются первые заморозки.

### 3.3 Режим осадков в бассейне озера

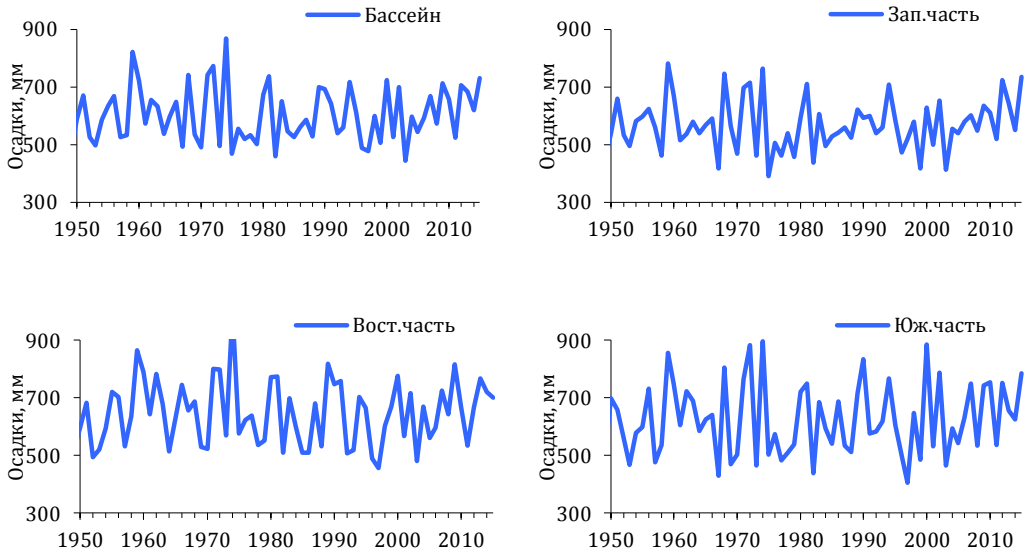
На *рисунке 3.7* представлено изменение годовых сумм осадков для всего бассейна и его отдельных частей. Средние годовые суммы осадков в целом по бассейну составляют около 600–700 мм. За период с 1950 по 2015 гг. годовые суммы осадков в южной и восточных частях бассейна изменялись от 400 до 900 мм, в то время как в западной части бассейна максимальные годовые суммы осадков не превышали 700 мм.

Анализ данных показал, что как в целом по бассейну, так и в его отдельных частях, начиная с 2000-х годов отмечается тенденция к увеличению осадков.

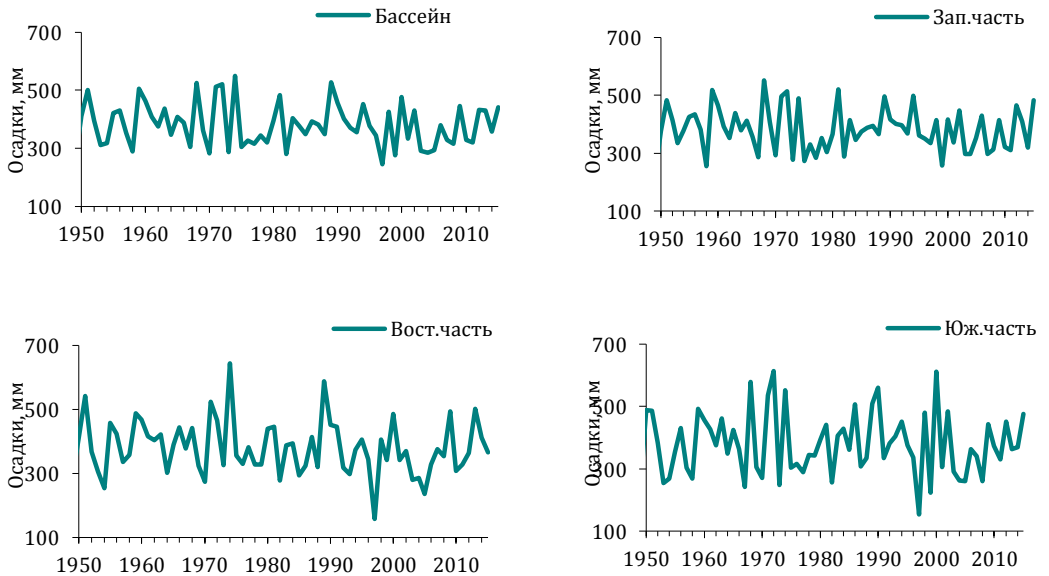
На *рисунке 3.8* показано изменение летних (июнь–сентябрь) сумм осадков в целом для бассейна озера и для его отдельных частей. Суммы летних осадков в южной и восточной частях бассейна испытывают значительные изменения от года к году, от 300 до 600 мм. Такие колебания летних сумм осадков связаны,

по-видимому, с изменением интенсивности муссонной циркуляции. В западной части бассейна летние суммы осадков изменяются в пределах 250–550 мм.

Как видно из *рисунка 3.9*, в целом для бассейна суммы зимних осадков значительно меньше сумм за летний период, за отдельные годы с 1950 по 2015 гг. суммы зимних осадков изменялись от 20 до 60 мм.



*Рисунок 3.7* – Изменение годовых сумм осадков по бассейну оз. Ханка в целом и в его отдельных частях



*Рисунок 3.8* – Изменение летних сумм осадков (июнь-сентябрь) по бассейну в целом и в его отдельных частях

Наиболее значительные изменения зимних осадков имеет место в восточной и южной частях бассейна, где в течение всего периода наблюдений их суммы изменялись от 20 до 90 мм. В западной части бассейна осадки существенно меньше чем в восточной и южной частях бассейна, в период с 1950 по 2015 гг. суммы зимних осадков изменялась от 20 до 55–60 мм.

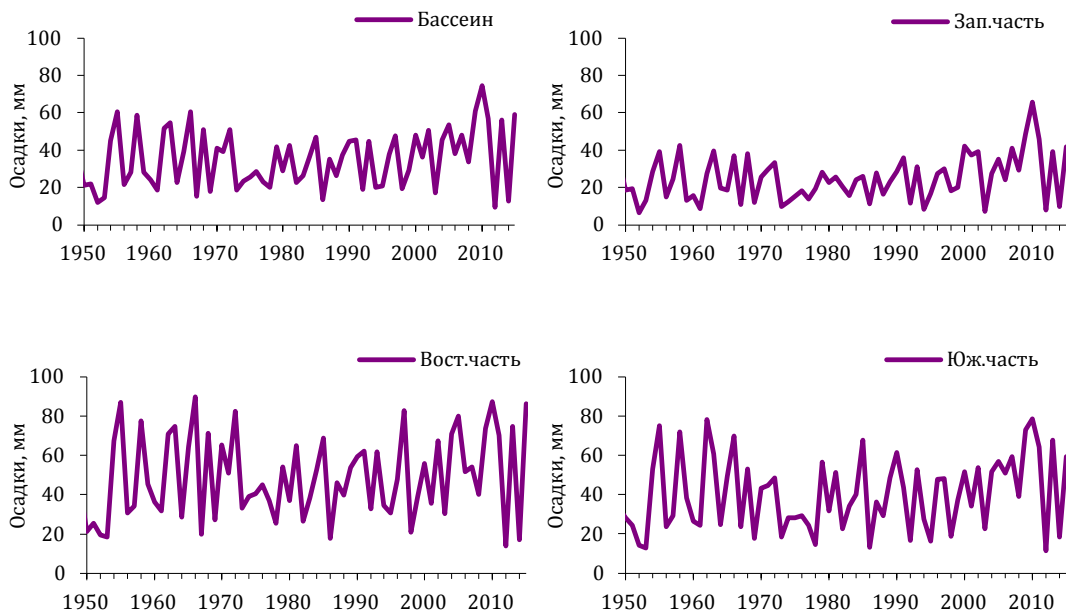


Рисунок 3.9 – Изменение зимних сумм осадков (декабрь-февраль) за период 1950–2015 гг. по бассейну в целом и его отдельным частям

На рисунке 3.10 представлено внутригодовое распределение осредненных по бассейну осадков. Летние суммы осадков составляют более 2/3 годовых.

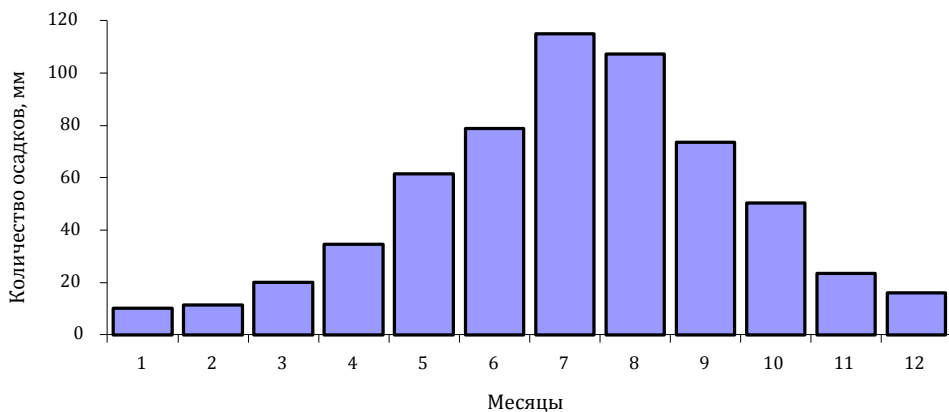


Рисунок 3.10 – Внутригодовое распределение осадков для всего бассейна озера

Влияние рельефа на режим осадков наиболее отчетливо проявляется в летнее время в южной и юго-западной частях бассейна. Начиная с 2000-х годов на станции Пограничный и гидрологических постах Дворянка и Ильинка отмечается устойчивая тенденция к росту летних муссонных осадков, что согласуется с общей концепцией увеличения интенсивности летнего муссона при развитии современного глобального потепления. Эту концепцию подтверждают и данные моделирования, которые показали, что следствием глобального потепления является усиление муссонной циркуляции. При этом, как показали данные наблюдений, количество аномально сильных осадков на российском Дальнем Востоке за последние годы (начиная с 2010 года) сильно увеличилось [9].

В таблице 3.5 приводится сравнение трендов осадков (мм/за 10 лет) для периодов 1981–2015 гг. и 2001–2015 гг. Тренды, значимые на 95% уровне, отмечены жирным шрифтом.

Таблица 3.5

Тренды осадков (°C/10 лет) за 2 периода: 1981–2015 гг. и 2001–2015 гг. для бассейна озера и его отдельных частей

Пункты	1981–2015 гг.			2001–2015 гг.		
	год	июнь-сентябрь	декабрь-февраль	год	июнь-сентябрь	декабрь-февраль
Бассейн в целом	17,5	-8,3	4,8	<b>96,0</b>	<b>60,6</b>	2,8
Западная часть	17,5	-10,4	<b>5,0</b>	<b>103,2</b>	45,5	2,0
Восточная часть	19,0	-2,4	4,6	<b>90,6</b>	<b>78,3</b>	3,9
Южная часть	19,9	-9,6	4,9	<b>93,0</b>	<b>69,8</b>	4,2
31913	-8,2	<b>-38,0</b>	<b>10,6</b>	66,0	-43,2	<b>32,2</b>
31921	14,5	-8,8	3,6	50,9	7,5	4,8
31923	22,1	5,1	4,4	23,0	35,4	7,6
31915	17,8	-7,1	2,7	<b>86,8</b>	<b>59,9</b>	-6,4
31924	31,5	2,5	5,5	<b>105,8</b>	<b>79,9</b>	3,5
31926	21,1	-6,1	6,9	<b>165,1</b>	<b>126,1</b>	6,3
31928	8,4	-21,7	4,2	80,1	<b>59,8</b>	5,0
31931	13,4	-5,7	2,6	<b>83,8</b>	<b>73,4</b>	-2,3
5238	<b>45,9</b>	-7,4	<b>12,3</b>	<b>197,3</b>	<b>87,3</b>	15,3
5239	4,4	-1,5	0,9	<b>58,9</b>	<b>45,6</b>	-5,9

Примечание: Жирным шрифтом выделены тренды, на 95% уровне

За последние 15 лет существенно изменились как величины, так и знак трендов для бассейна в целом и его отдельных частей. В отличие от предшествующего периода, тренды летних сумм осадков изменили знак с отрицательного на положительный.

В *таблице 3.6* представлены коэффициенты парной корреляции между рядами осадков для метеостанций, расположенных в бассейне озера. Видно, что поле годовых сумм осадков в пределах небольшого по территории бассейна оз. Ханка имеет неплохую связанность – коэффициенты парной корреляции в большинстве случаев превышают 0,5. Летом эта однородность существенно нарушается, однако в пределах выделенных районов (западная, восточная и южная части бассейна) корреляция остается высокой – от 0,5 до 0,8. Исключением является пост Дворянка, что связано с особенностями его положения в предгорье, в отличие от остальных станций, расположенных на равнине.

*Таблица 3.6*

Коэффициенты парной корреляции между рядами осадков для метеостанций в бассейне оз. Ханка (верхняя часть – год, нижняя – летний период)

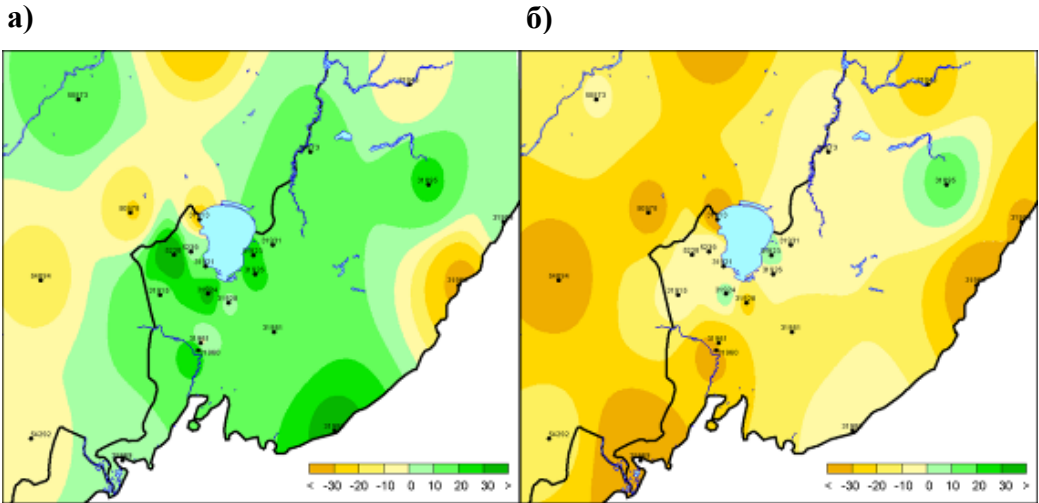
Год Лето	31913	31921	31923	31915	31924	31926	31928	31931	5238	5239
31913		0,77	0,37	0,47	0,55	0,55	0,47	0,56	-0,11	0,68
31921	0,72		0,58	0,73	0,79	0,62	0,69	0,68	-0,07	0,85
31923	0,21	0,46		0,38	0,55	0,65	0,53	0,74	0,01	0,52
31915	0,53	0,73	0,29		0,85	0,51	0,69	0,45	-0,15	0,73
31924	0,41	0,69	0,40	0,82		0,63	0,85	0,64	-0,02	0,75
31926	0,27	0,54	0,60	0,49	0,58		0,72	0,82	0,20	0,53
31928	0,33	0,63	0,43	0,64	0,82	0,75		0,70	0,16	0,62
31931	0,36	0,63	0,72	0,48	0,54	0,80	0,66		0,08	0,58
5238	-0,04	-0,01	-0,08	-0,08	-0,12	0,15	0,11	-0,08		-0,08
5239	0,64	0,79	0,40	0,72	0,64	0,42	0,47	0,52	-0,10	

На *рисунке 3.11* представлены карты пространственного распределения трендов годовых (а) и летних (б) сумм осадков за период 1981–2015 гг.

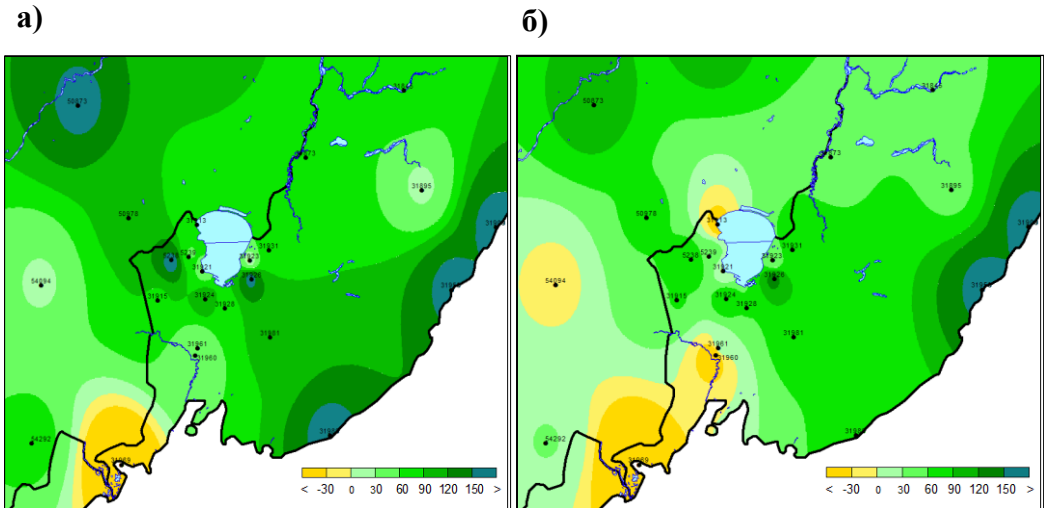
Видно, что тренды годовых сумм осадков за этот период положительны для всего бассейна, наибольшие их значения отмечаются в непосредственной близости от озера. Летом значения трендов отрицательны для всего бассейна, небольшие положительные значения характерны для южной и восточной частей бассейна.

Тренды осадков, рассчитанные за период 2001–2015 гг. (*рисунок 3.12*), дают совершенно иную картину. В среднем за год на всей территории бассейна тренды положительны, причем наибольшие величины их отмечаются в непосредственной близости от озера. Тренды летних осадков также положительны для всего бассейна.

Как видно из *таблицы 3.5*, тренды летних осадков за этот период статистически значимы (на 95% уровне) для большинства станций в бассейне озера и на прилегающей к нему территории.



*Рисунок 3.11* – Тренды годовых (а) и летних (б) сумм осадков (мм/10 лет) за период 1981–2015 гг.



*Рисунок 3.12* – Тренды годовых (а) и летних (б) сумм осадков (мм/10 лет) за период 2001–2015 гг.

На *рисунке 3.13* приведен вклад тропических циклонов в общую сумму осадков, выпадающих в южных районах Приморья. Как видно из рисунка, с тропическими циклонами связаны сильные осадки, но их вклад в общий режим увлажнения региона сопоставим, и не превосходит осадки циклонов полярного фронта.

Анализ связи некоторых индексов циркуляции атмосферы, рассчитываемых по Северному полушарию или его части, которые могли бы представлять интерес

при выявлении особенностей сезонов с разными режимами увлажнения в бассейне озера Ханки, определяемых дальними связями с крупномасштабными циркуляционными аномалиями, пока не дал интересных результатов.

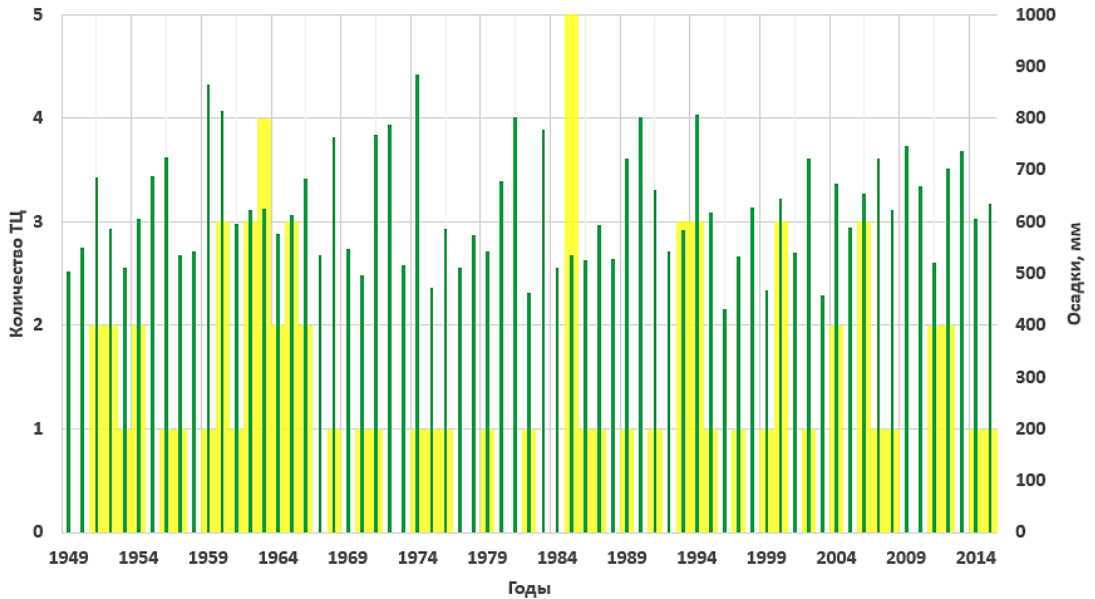


Рисунок 3.13 – Годовые суммы осадков в районе оз. Ханка (1949–2015 гг.) и количество тропических циклонов (ТЦ), оказавших влияние на осадки юга Приморского края (1951–2015 гг.)

Существует определенная сложность в сопоставлении синоптических индикаторов с годовыми значениями составляющих водного баланса (притока речных вод, осадков, испарения) озера Ханка, поскольку для атмосферных процессов из-за влияния большого количества факторов и в силу большой пространственной и временной изменчивости средние годовые характеристики оказываются малоинформативными.

Для анализа была выбрана геопотенциальная высота изобарической поверхности АТ-500 гПа (H500, геопотенциальные метры) в июле-августе, так как, большая часть осадков выпадет в теплый период года, а именно в июле-августе (реанализ NCEP/NCAR, 2.5°). H500 хорошо коррелирует со средней температурой воздуха, для метеостанций, расположенных около озера Ханка, в июле-августе коэффициент корреляции составляет 0,64. На *рисунке 3.14* приведены временные серии средней температуры на метеостанции Астраханка и H500 в июле-августе в 1949–2015 гг. Для обоих графиков характерен небольшой положительный тренд.



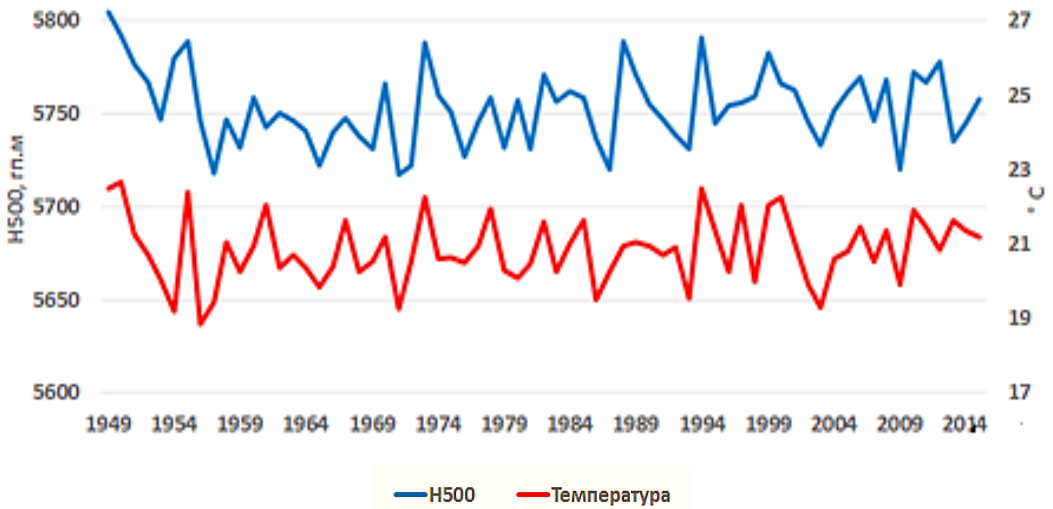


Рисунок 3.14 – Средняя температура на м/ст Астраханка и геопотенциал H500 в районе озера Ханка в 1949–2015 гг.

С осадками такой хорошей связи нет (рисунок 3.15), хотя в ситуациях с избыточным увлажнением чаще отмечается пониженный геопотенциал, который может свидетельствовать об особой локализации и активности муссонной ложбины и соответствующей ей циклонической деятельности. С другой стороны, воздух с более высокой температурой потенциально может содержать больше влаги, и осадки могут выпадать более интенсивные.

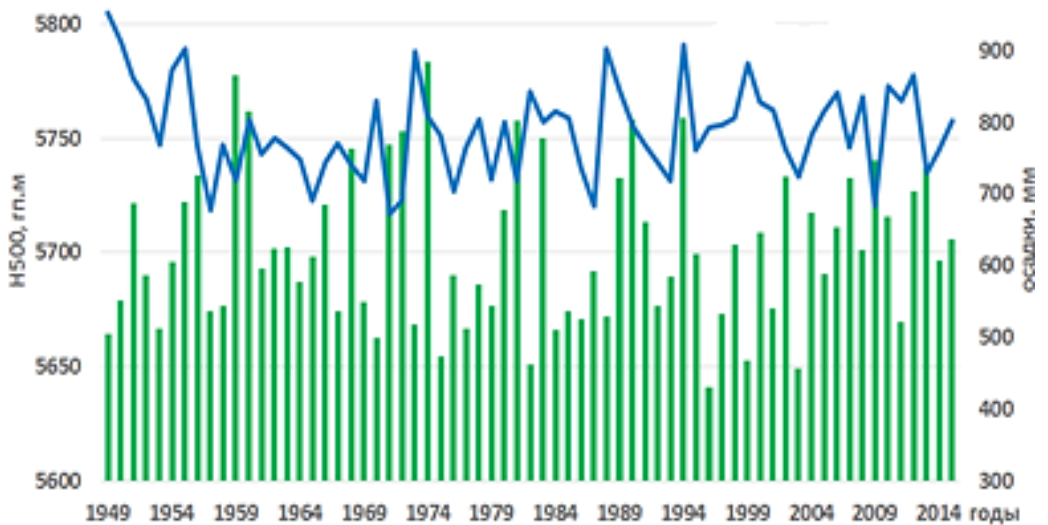


Рисунок 3.15 – Годовое количество осадков и геопотенциал H500 в районе оз. Ханка в 1949–2015 гг.

На примере летних сезонов 2008 и 2013 гг. проведенный анализ разложения полей вертикальной составляющей завихренности на уровне  $H500$  гПа по естественным ортогональным функциям подтвердил вклад в пространственно-временную изменчивость полей первых трех собственных векторов, составляющий 50–52 %: особенности диполя, формирующего муссонную циркуляцию – дальневосточную ложбину над восточной частью Азии и гребня (отрога) Гавайского антициклона; отклонения, вносимые крупномасштабными движениями общей циркуляции атмосферы внетропических широт (планетарными волнами, волнами Россби); движениями синоптического масштаба (циклонами).

## 4. Морфометрические характеристики озера Ханка

### 4.1 Результаты полевых инженерно-гидрологических и морфометрических работ

До настоящего времени все морфометрические характеристики озера Ханка были установлены на основе промеров, выполненных гидрографической службой КТОФ МО СССР в 1969 г., по результатам которых Гидрографическим управлением МО в том же году была издана лоцманская карта озера Ханка масштаба 1:100 000 (код объекта 63098). Последнее издание карты выполнено в 2007 г. Главным управлением навигации и океанографии МО РФ в г. Санкт-Петербурге.

Выполнение полевых инженерно-гидрологических работ было обусловлено необходимостью дополнения имеющихся в литературе морфометрических характеристик оз. Ханка аналогичными сведениями при уровнях воды, превышающих исторический максимум. Такие работы были выполнены специалистами ГГИ и Приморского УГМС в мае-июне 2016 г.

Вследствие того, что котловина дна озера в срединной его части сравнительно ровная и имеет очень пологий наклон к зоне наибольших глубин [1], потребовалось их уточнение в прибрежной зоне. Был выполнен анализ особенностей изменения прибрежных профилей рельефа дна оз. Ханка, который позволил обосновать методику производства промеров. На *рисунке 4.1* видно, что перелом профиля глубин начинается на расстоянии не далее 4 км от берега. Диапазон изменения глубин на этом расстоянии от берега полностью перекрывает диапазон возможного изменения уровня оз. Ханка.

Прибрежная зона промеров была разбита на мелководную – с глубинами от 0 до 1,5–2,0 м, и более глубокую – на удалении от береговой линии до 4 км. Промеры выполнялись с катера «Орион», имеющего осадку 1,2 м (глубоководная часть съемки) и моторной лодки «Казанка-5-М7». На катере был установлен автоматизированный промерный комплекс, в состав которого входило следующее оборудование: промерный эхолот «Скат-250», GNSS приемники EFT-M1 и программное обеспечение AquaScan Standard. На моторной лодке установлен карт-плоттер Echowar 42dv CHIR.

На территории озерной станции в точке с известными координатами и высотой была развернута базовая станция приемника EFT-M1. Режим работы станции совпадал с режимом выполнения промеров. Приемники-роверы находились соответственно на катере «Орион» и моторной лодке. Приемник на катере входил в автоматизированный промерный комплекс, а второй ровер использовался на моторной лодке для фиксирования планового и высотного положения точек урезом береговой линии и рельефных точек.

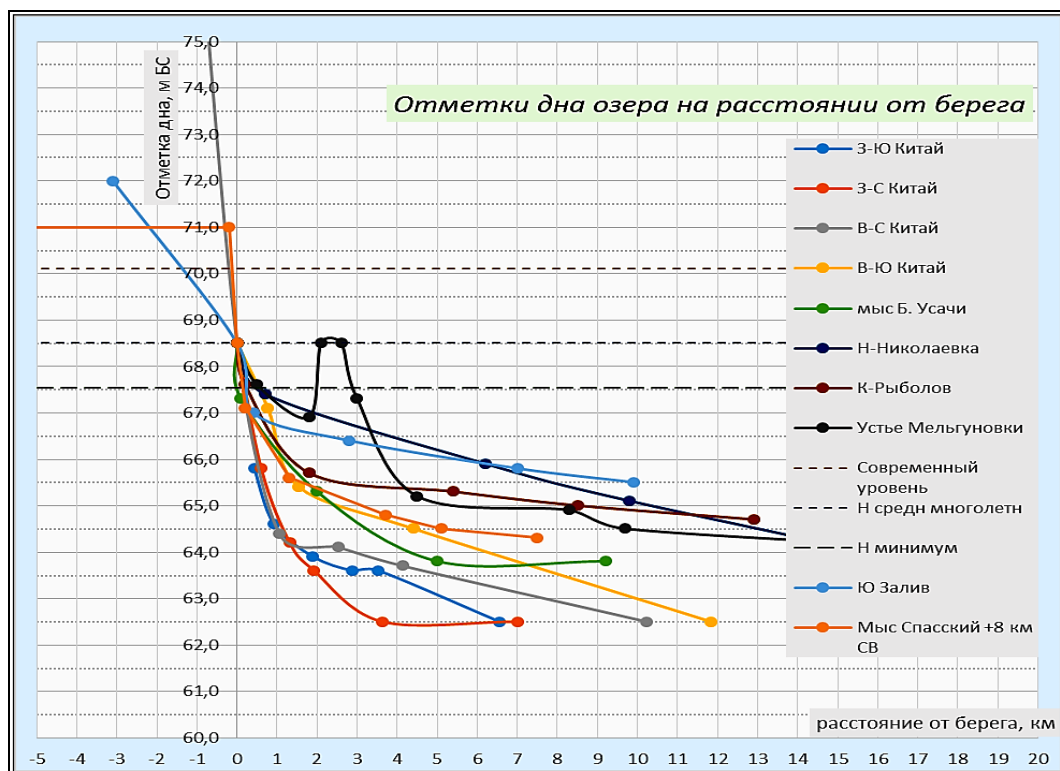


Рисунок 4.1 – Профили рельефа дна оз. Ханка в прибрежной зоне

На *рисунке 4.2* представлена схема заездов, выполненных в период с 16 мая по 2 июня 2016 года. Промеры с катера «Орион» выполнялись по заранее проложенным косым галсам. Положение судна во время работы отображалось на экране монитора и контролировалось оператором катера. Промеры с моторной лодки выполнялись также по косым галсам, при этом расстояние между береговыми точками галса составляло около 500 м. Промеры эхолотом были выполнены, в основном, в прибрежной зоне российской части озера. Помимо этого, 21 мая, 28 мая и 1 июня 2016 года были проведены промеры глубин по трем поперечным профилям, *рисунке 4.3*. Основное назначение этих работ – уточнение возможных изменений отметок дна оз. Ханка в центральной части водоема за период времени прошедший с момента последних промеров.

На *рисунках 4.4–4.6* изображены поперечные профили озера. Во время выполнения промерных работ на прибрежной акватории оз. Ханка с моторной лодки одновременно осуществлялось рекогносцировочное обследование участков прибрежных территорий с фотосъемкой состояния береговой линии и объектов инфраструктуры, испытывающих на себе негативное воздействие подъема уровня воды в озере.

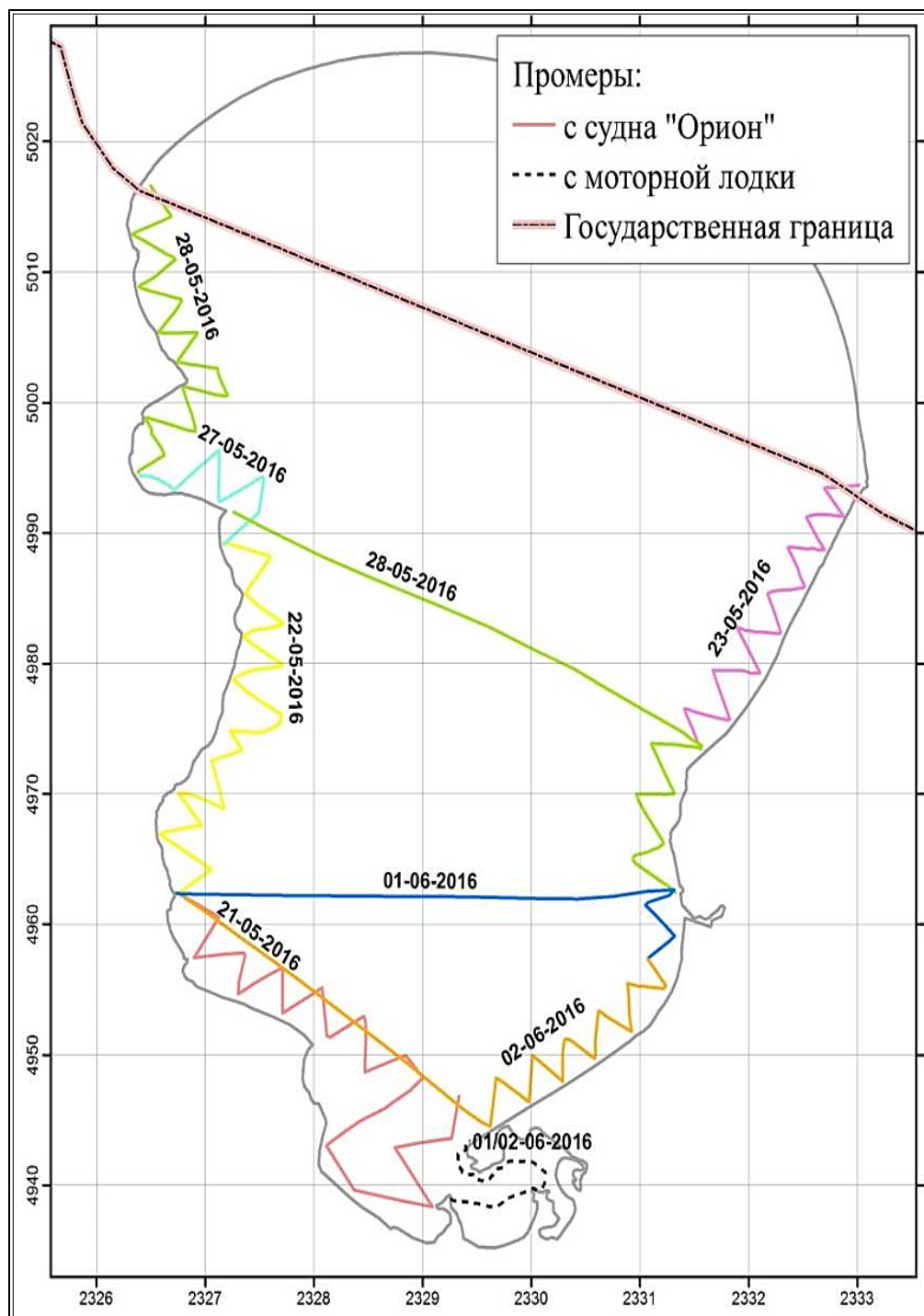


Рисунок 4.2 – Промеры глубин, выполненные в период с 16 мая по 2 июня 2016 г. в пределах российской части оз. Ханка

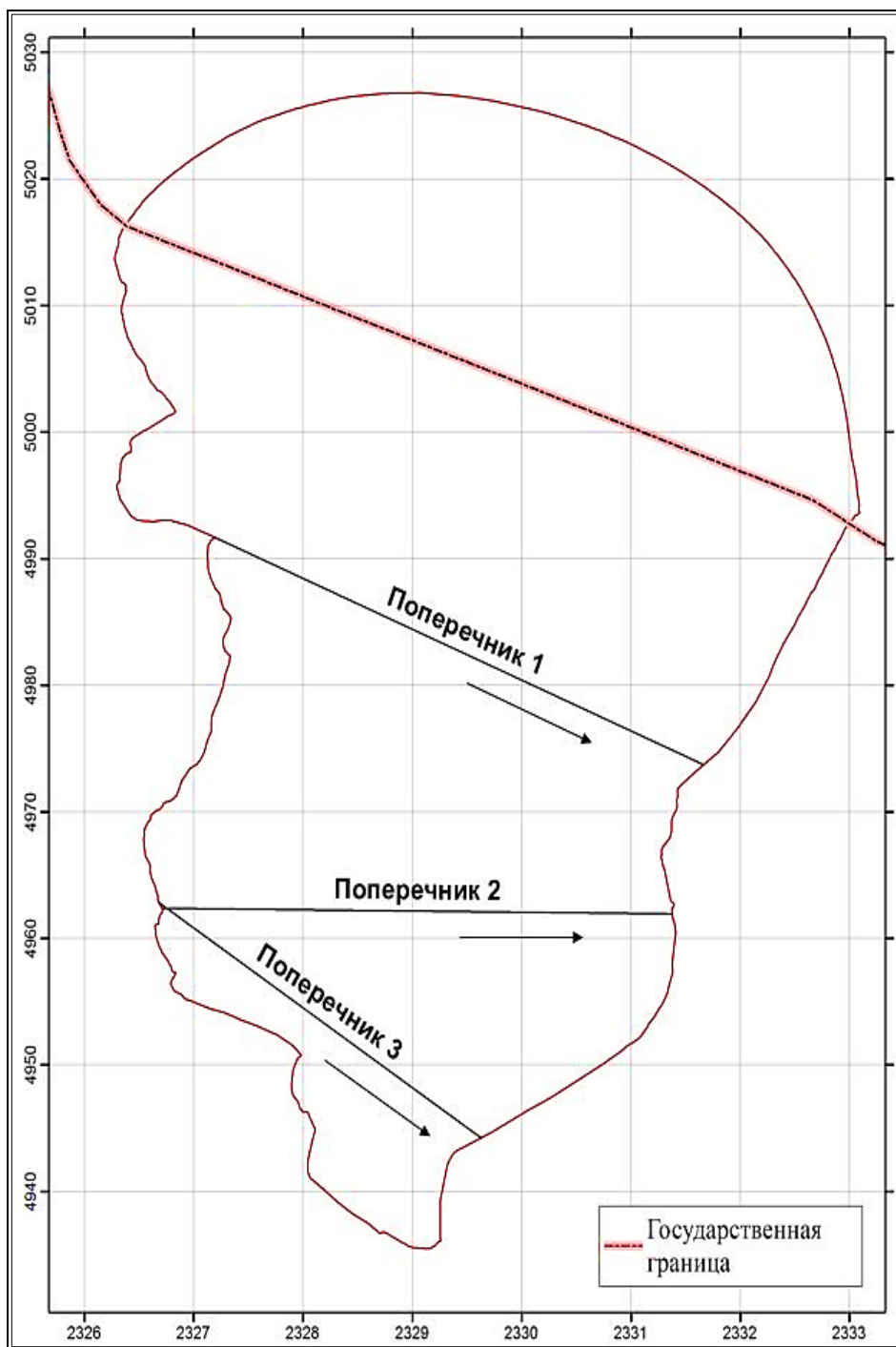


Рисунок 4.3 – Характерные профили оз. Ханка

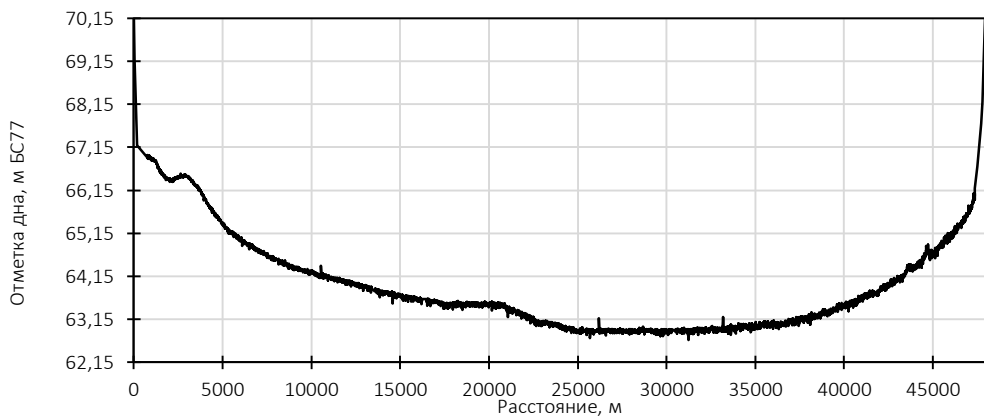


Рисунок 4.4 – Поперечный профиль №1

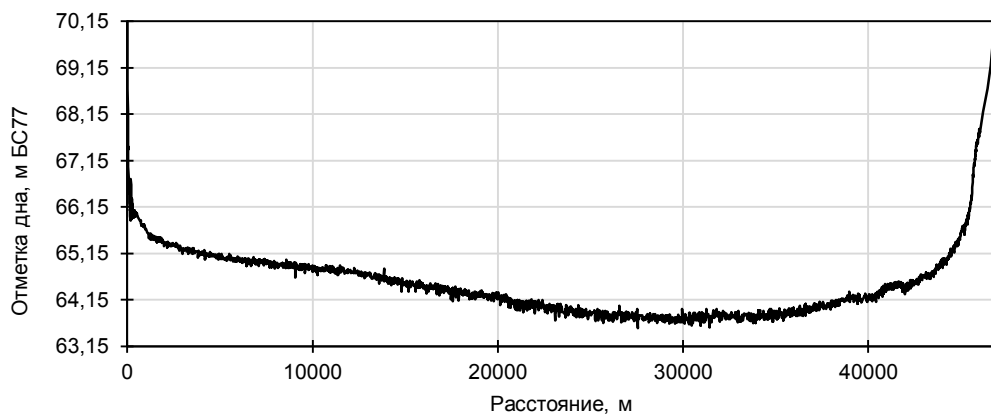


Рисунок 4.5 – Поперечный профиль №2

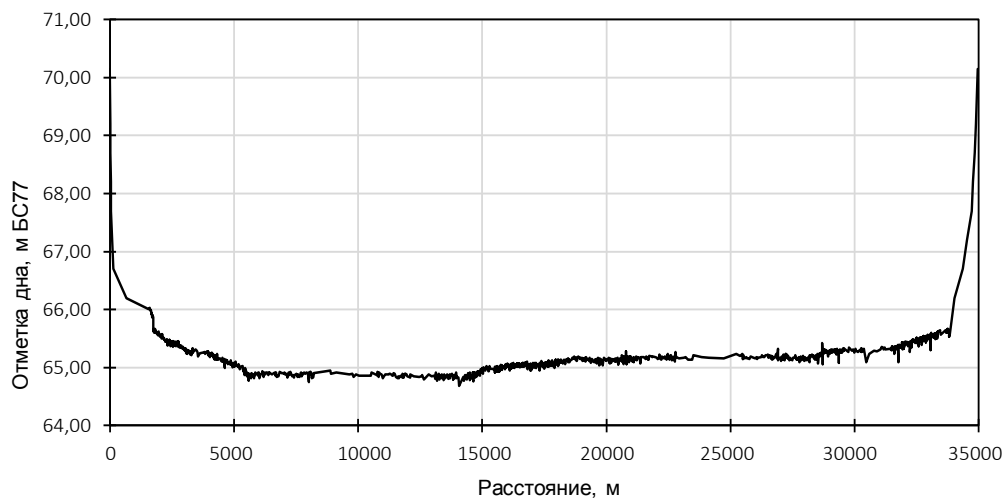


Рисунок 4.6 – Поперечный профиль №3

## 4.2 Оценка современных морфометрических характеристик озера Ханка

В условиях повышенных уровней воды в озере актуальной являлась задача уточнения его морфометрических характеристик, корректная оценка которых необходима для расчетов элементов водного баланса, моделирования процессов затопления прибрежных территорий и пр.

Для оценки морфометрических характеристик озера Ханка были использованы следующие картографические материалы:

1) Топографическая карта масштаба 1:100 000 2007 г. Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации, составленная по результатам промеров галсами через 500–1000 метров в 1968 г., маршрутных промеров 1961–1962 гг. и по материалам топографических карт 1979, 1985–1987 гг. Высота сечения рельефа 20 м. Система высот – Балтийская 1977 г. (далее – БС77);

2) Топографические карты масштаба 1:25 000 на российское побережье оз. Ханка. Высота сечения рельефа 20 метров. Система высот – БС77;

3) Промеры глубин, выполненные в период с 16 мая по 2 июня 2016 года в пределах российской части оз. Ханка.

На рисунке 4.7 (здесь и далее схемы и карты приводятся в СК Пулково 1942, зона 23) представлена карта глубин озера, полученная путем перевода в цифровой вид карты Главного управления навигации и океанографии масштаба 1:100 000. Наиболее подробно освещена наблюдениями российская часть озера. Промеры глубин, выполненные для составления этой карты, были равномерно распределены по российской части акватории озера.

В процессе работы были использованы архивные спутниковые снимки SPOT и LandSAT за периоды, характеризующиеся различными уровнями воды (от 68,1 до 70,15 м БС77) – с 1986 по 2016 гг. Данные исходных снимков представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Спутниковые снимки озера за период 1986–2016 гг.

Номенклатура снимка	Дата	Уровень, м БС77	Разрешение снимка, м/пкс
SPOTCIBN45E132	14.09.1986	68,23	10
LT51140291992188HAJ00	04.06.1992	68,93	30
LE71140292000186HAJ01	04.07.2000	68,10	30
LC81140292014264LGN00	21.09.2014	69,59	30
LC81140292016158LGN00	06.06.2016	70,15	30



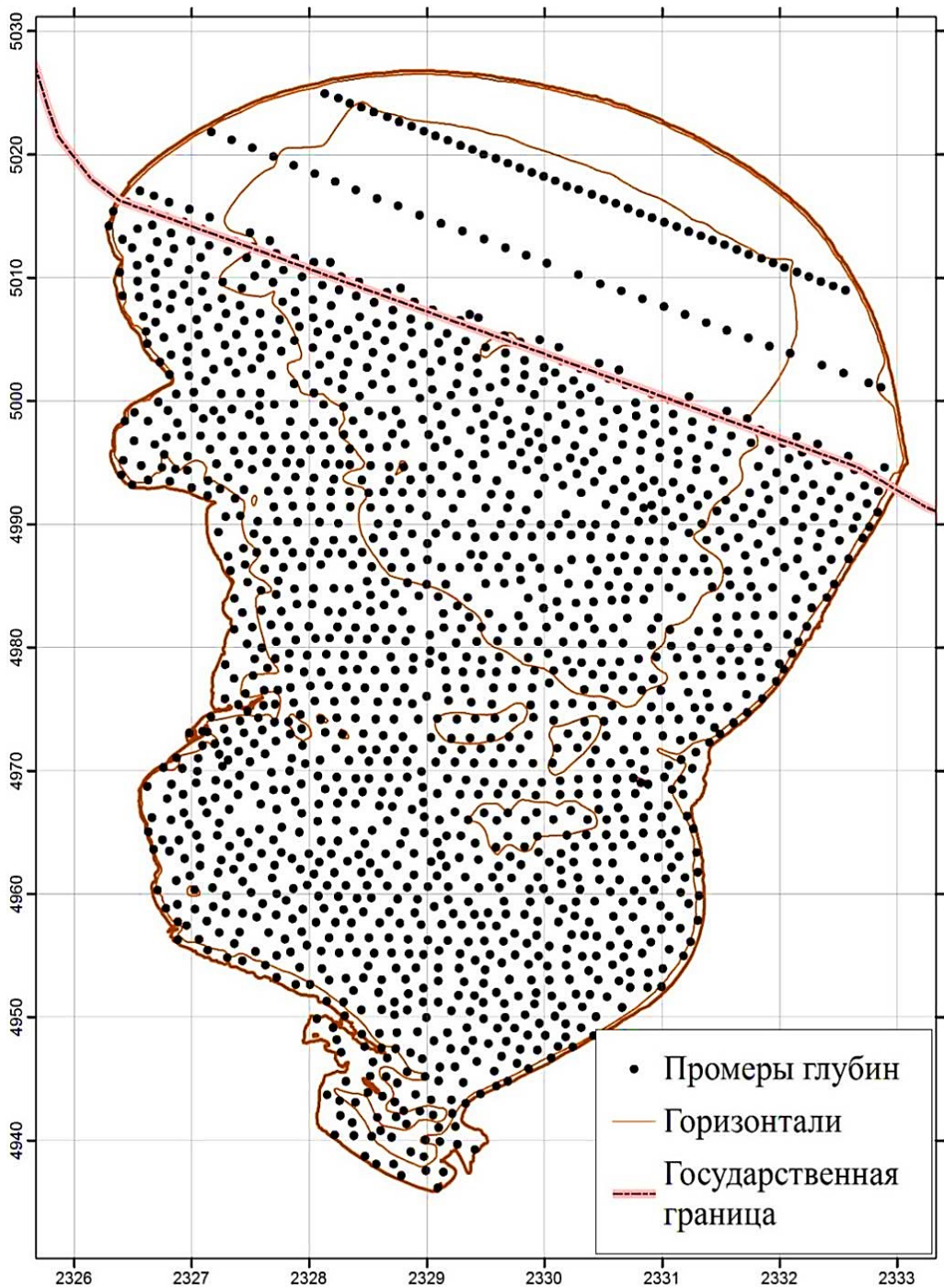
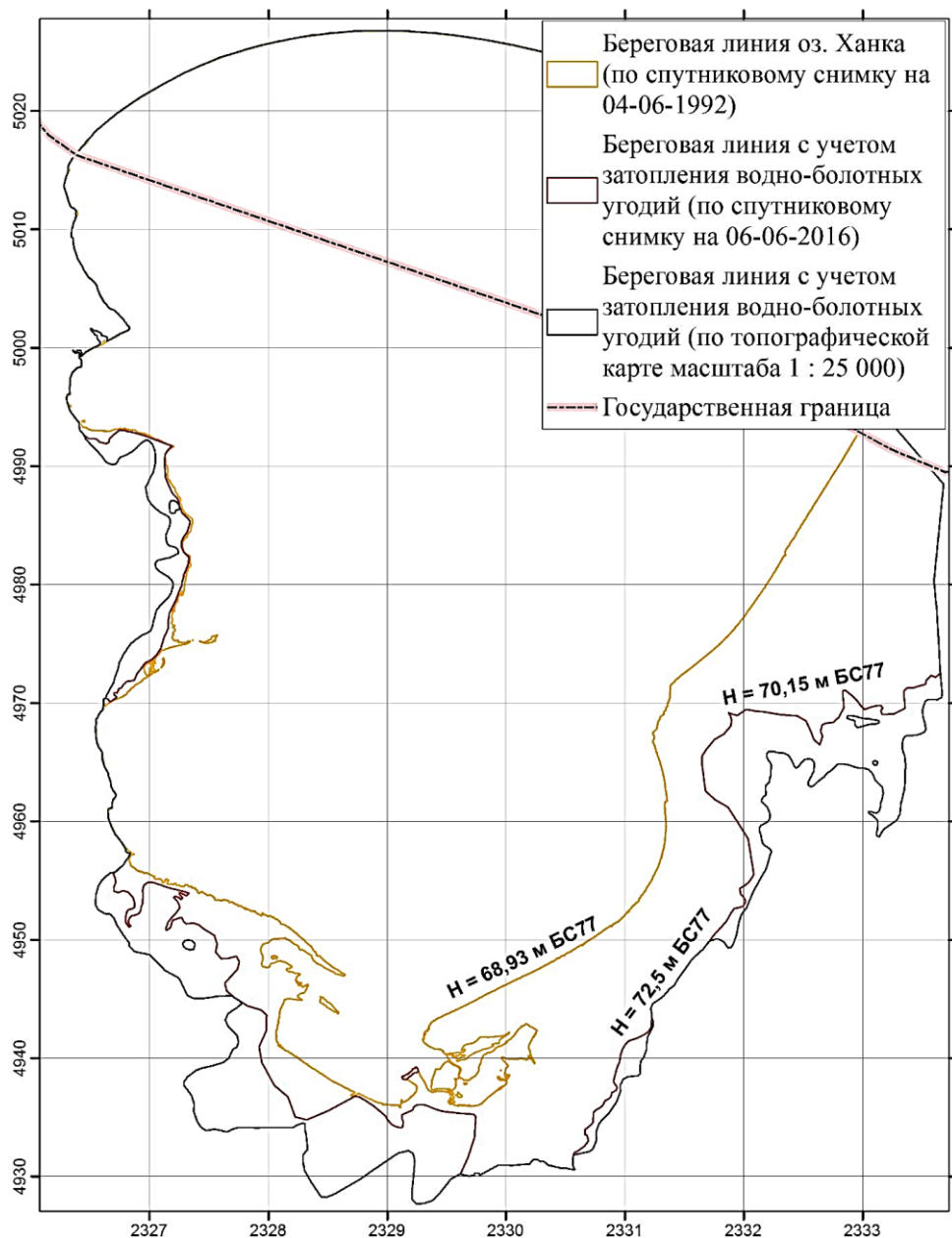


Рисунок 4.7 – Точки промеров глубин и изобаты, снятые с оцифрованной топографической карты масштаба 1:100 000

По указанным снимкам вручную проводилось оконтуривание береговой линии озера, лиманов и водно-болотных угодий. Контуры берега, полученные со снимков, позволили уточнить береговую линию водоема в его южной и юго-восточной частях, *рисунок 4.8*.

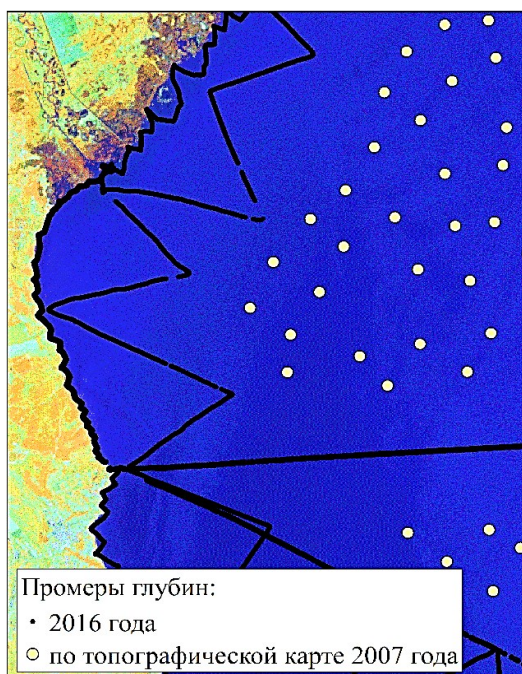


*Рисунок 4.8* – Совмещенные береговые линии оз. Ханка, полученные по спутниковым снимкам и топографической карте масштаба 1 : 25 000

Разработка цифровой модели рельефа дна озера включала следующие этапы:

- оцифровка исходного архивного картографического материала: изолиний, высотных точек и береговой линии;
- обработка промеров глубин, выполненных в период с 16 мая по 2 июня 2016 г.
- перевод модели в растровый вид и непосредственно построение цифровой модели рельефа в формате TIN.

Промеры глубин, выполненные в период с 16 мая по 2 июня 2016 г., позволили увеличить точность построения ЦМР в прибрежных зонах российской части оз. Ханка и в местах прохождения поперечников, *рисунок 4.9*.



*Рисунок 4.9* – Фрагмент исходной информации для построения цифровой модели рельефа оз. Ханка

Цифровая модель рельефа (*рисунок 4.10*) была выполнена до отметки 72,50 м БС77. Вследствие того, что вдоль долины р. Сунгач отметки местности снижаются от озера по направлению к водоприемнику – р. Уссури, здесь необходимо было установить жесткую границу области покрытия ЦМР, в качестве которой была принята дамба обвалования Александровского канала, в настоящее время ограничивающая дальнейшее распространение озерных вод. Отметки рельефа в диапазоне 70,15–72,50 м БС77 снимались с топографической карты масштаба 1:25000. Созданная поверхность позволяет получить площади и объемы озера для любого заданного шага по вертикали.

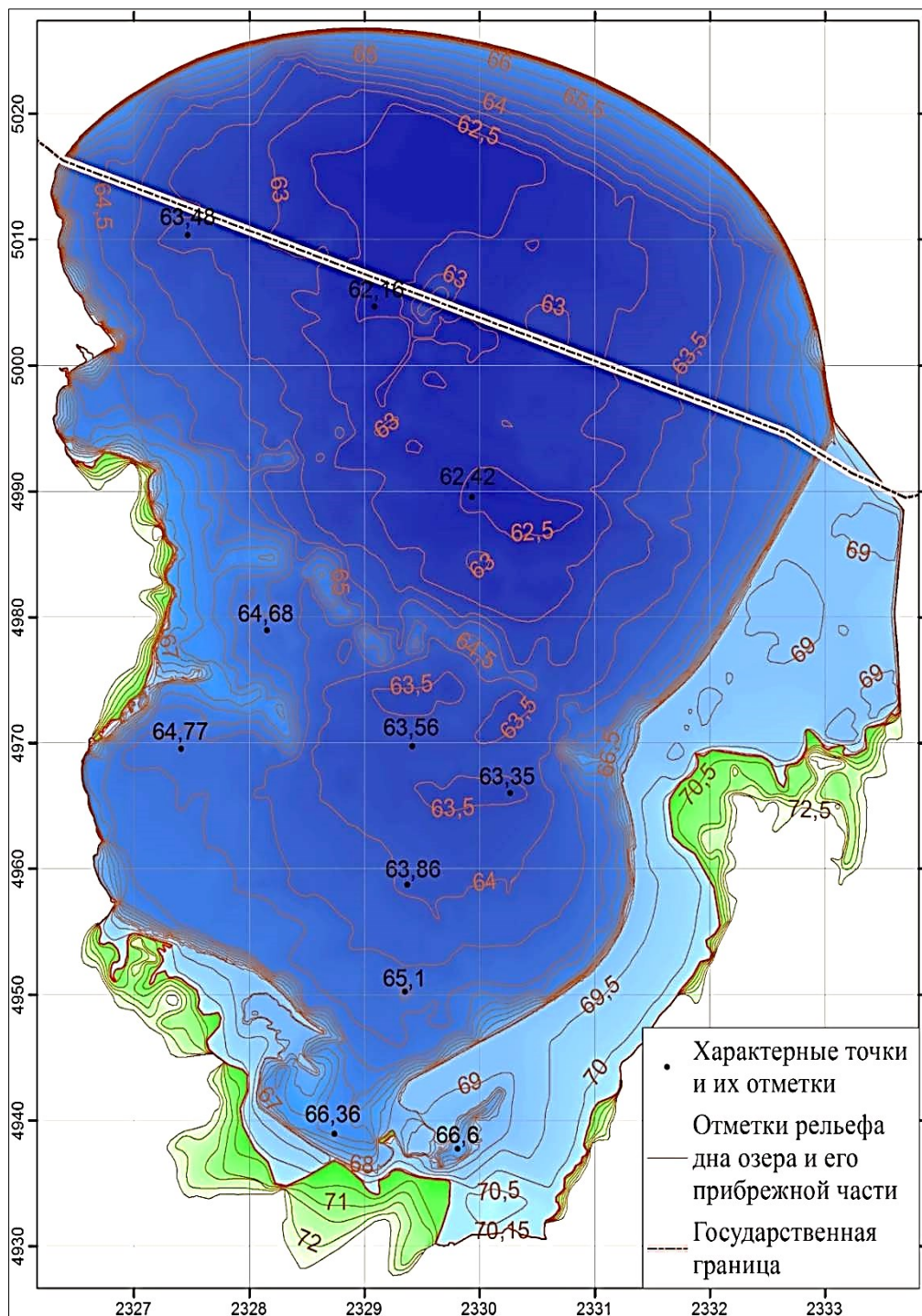


Рисунок 4.10 – Цифровая модель рельефа оз. Ханка

Результаты оценки основных морфометрических характеристик:

*Определение длины водоема.* Длина водоема – кратчайшее расстояние между двумя наиболее удаленными точками береговой линии, измеряемое по поверхности воды, *рисунок 4.11.*

Береговая линия оз. Ханка в коренных берегах (без учета затопленных водно-болотных угодий) получена по спутниковому снимку Landsat 8 на 6 июня 2016 г. при уровне воды 70,15 м БС77. Длина оз. Ханка с учетом затопления территорий составила 98,58 км, длина в коренных берегах – 91,24 км.

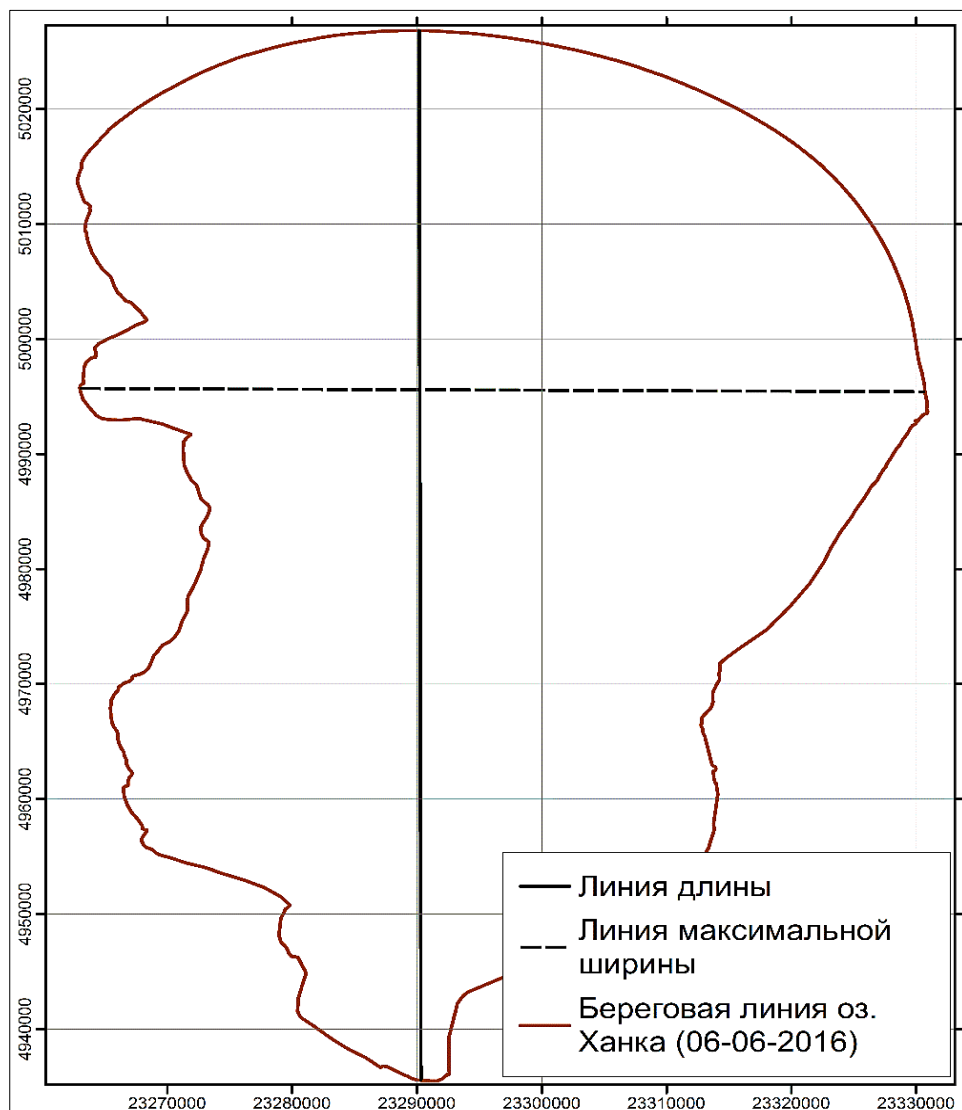


Рисунок 4.11 – Определение длины и максимальной ширины водоема в коренных берегах

В таблице 4.2 приведены результаты расчетов площади поверхности озера и площадей, ограниченных изобатами.

Таблица 4.2

Площадь поверхности озера и площади, ограниченные изобатами

Отметка дна, м БС77	70,15	70	69	68	67	66	65	64	63
Площадь, км <sup>2</sup> (с учетом затопления территорий)	4955,5	4916,3	4260,2	4038,5	3904,5	3623,3	3057,3	2032,1	849,6
Площадь, км <sup>2</sup> (в коренных берегах)	4162,4	4157,3	4117,7	4038,5	3904,5	3623,3	3057,3	2032,1	849,6

*Определение ширины озера.* Максимальная ширина равна наибольшей длине перпендикуляра к линии длины, измеренной по поверхности озера, рисунок 4.11. Максимальная ширина оз. Ханка с учетом затопления территорий составила 74,55 км. Максимальная ширина в коренных берегах – 67,7 км.

Средняя ширина – отношение площади водной поверхности озера ( $f_0$ ) к его длине ( $L$ ):

$$B_{cp} = \frac{f_0}{L} = 50,27 \text{ км (с учетом затопления территорий);} \quad (4.1)$$

$$B_{cp} = \frac{f_0}{L} = 45,62 \text{ км (в коренных берегах).} \quad (4.2)$$

*Определение длины береговой линии и длины изобат.* В таблице 4.3 приведены результаты расчетов значений длины береговой линии и длин изобат.

Таблица 4.3

Длина береговой линии и длины изобат

Изобата, м БС77	70,15 (береговая линия)	70	69	68	67	66	65	64	63
Длина, км (с учетом затопления территорий)	357,53	350,22	423,95	324,66	320,02	319,71	318,03	261,14	184,68
Длина, км (в коренных берегах)	280,05	275,51	284,65	324,66	320,02	319,71	318,03	261,14	184,68

*Определение коэффициента развития береговой линии.* Коэффициент характеризуется отношением длины береговой линии к длине окружности круга  $S_0$ , имеющего площадь, равную площади поверхности озера  $f_0$ :

$$m_1 = \frac{S}{S_0} = \frac{S}{2\sqrt{\pi f_0}} = 1,43 \text{ (с учетом затопления территорий)}, \quad (4.3)$$

$$m_1 = \frac{S}{S_0} = \frac{S}{2\sqrt{\pi f_0}} = 1,43 \text{ (в коренных берегах)}. \quad (4.4)$$

Определение среднего уклона дна озера

Средний уклон дна озера  $I$  рассчитывался по формуле:

$$I = \frac{S/2 + l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n} \cdot \frac{H_{\max}}{f_0} = 0,0005 \text{ (с учетом затопления территорий)}; \quad (4.5)$$

торий);

$$I = \frac{S/2 + l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n} \cdot \frac{H_{\max}}{f_0} = 0,0006 \text{ (в коренных берегах)} \quad (4.6)$$

где  $l_1, l_2, \dots, l_n$  – длины изобат, взятые из таблицы 4.3;  $n$  – число изобат;  $H_{\max}$  – максимальная глубина озера;  $f_0$  – площадь поверхности озера.

*Определение объема озера.* Объем воды в озере  $W$  находился аналитически, путем представления части котловины, заполненной водой, в виде правильной геометрической фигуры. Расчет проводился методом усеченной пирамиды, по формуле:

$$W = \frac{H_1}{3}(f_0 + f_1 + \sqrt{f_0 f_1}) + \frac{H_2}{3}(f_1 + f_2 + \sqrt{f_1 f_2}) + \dots + \frac{H_n}{3}(f_{n-1} + f_n + \sqrt{f_{n-1} f_n}) + \frac{H_k}{3} f_n \quad (4.7)$$

в которой  $f_0, f_1, \dots, f_n$  – площади, ограниченные изобатами;  $H_1, H_2, \dots, H_n$  – вертикальные расстояния между изобатами;  $H_k$  – расстояние между  $H_{\max}$  и горизонтальной плоскостью последней  $n$ -ной изобаты. Результаты расчетов представлены в *таблице 4.4*.

Таблица 4.4

Объем озера и объемы, ограниченные изобатами

Отметка дна, м БС77	70,15	70	69	68	67	66	65	64	63
Объем, км <sup>3</sup> (с учетом затопления территорий)	24,84	24,05	19,40	15,45	11,47	7,73	4,34	1,77	0,33
Объем, км <sup>3</sup> (в коренных берегах)	24,29	23,66	19,40	15,45	11,47	7,73	4,34	1,77	0,33

*Определение средней и максимальной глубины озера.* Средняя глубина озера равна частному от деления объема водоема ( $W$ ) на площадь его водной поверхности ( $f_0$ ):

$$H_{cp} = \frac{W}{f_0} = 5,01 \text{ м (при уровне 70,15 м БС77 с учетом затопления тер)} \quad (4.8)$$

$$H_{cp} = \frac{W}{f_0} = 5,83 \text{ м (при уровне 70,15 м БС77 в коренных берегах)}. \quad (4.9)$$

Минимальная отметка дна озера составляет 62,2 м БС77.

Максимальная глубина  $H_{\text{макс}}$  составляет 7,95 м при уровне озера 70,15 м БС77.

Координаты точки с максимальной глубиной: 132°20' в.д., 45°09' с.ш.

*Построение батиграфической и объемной кривых.* Батиграфические  $f=f(H)$  и объемные  $W=f(H)$  кривые (рисунки 4.12 – 4.13) построены на основании расчетов площадей водной поверхности озера  $f_0, f_1, f_2, f_n$  и объемов воды  $W_1, W_2, \dots, W_n$ , соответствующих различным уровням наполнения водоема (от 62,2 м до 72,5 м). Для этого цифровая модель рельефа дна и прибрежной зоны озера последовательно пересекалась горизонтальными плоскостями, соответствующими различным уровням озера. Расчет объема проводился путем умножения площади озера на среднее значение глубины при заданном уровне. Для сравнения на рисунках приведены данные Васьковского М. Г. [5].

*Основные характеристики озера.* Основные морфометрические характеристики, приведенные к максимальному наблюдаемому уровню озера 70,15 м БС77 представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Основные морфометрические характеристики, приведенные к максимальному наблюдаемому уровню озера 70,15 м БС77

Основные морфометрические характеристики	С учетом затопления территорий	В коренных берегах
Площадь озера ( $f_{\text{оз}}$ ), км <sup>2</sup>	4955,5	4162,4
Объем воды ( $W$ ), км <sup>3</sup>	24,84	24,29
Длина озера ( $L$ ), км	98,58	91,24
Средняя ширина ( $B_{cp}$ ), км	50,27	45,62
Максимальная ширина ( $B_{\text{макс}}$ ), км	74,55	67,7
Средняя глубина ( $H_{cp}$ ), м	5,01	5,83
Уклон дна озера ( $I$ ), ‰	0,5	0,6



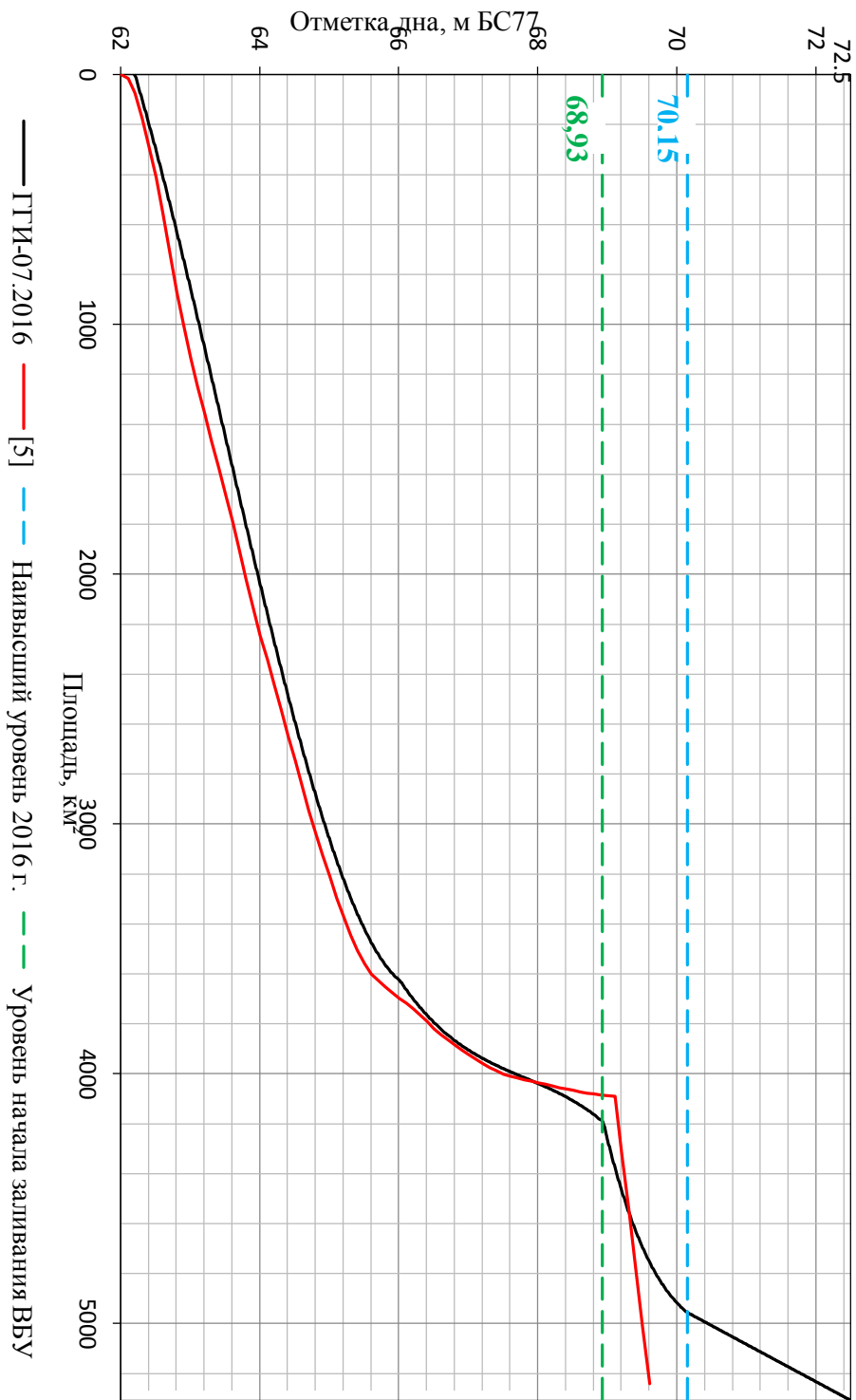


Рисунок 4.12 – Батиграфическая кривая оз. Ханка

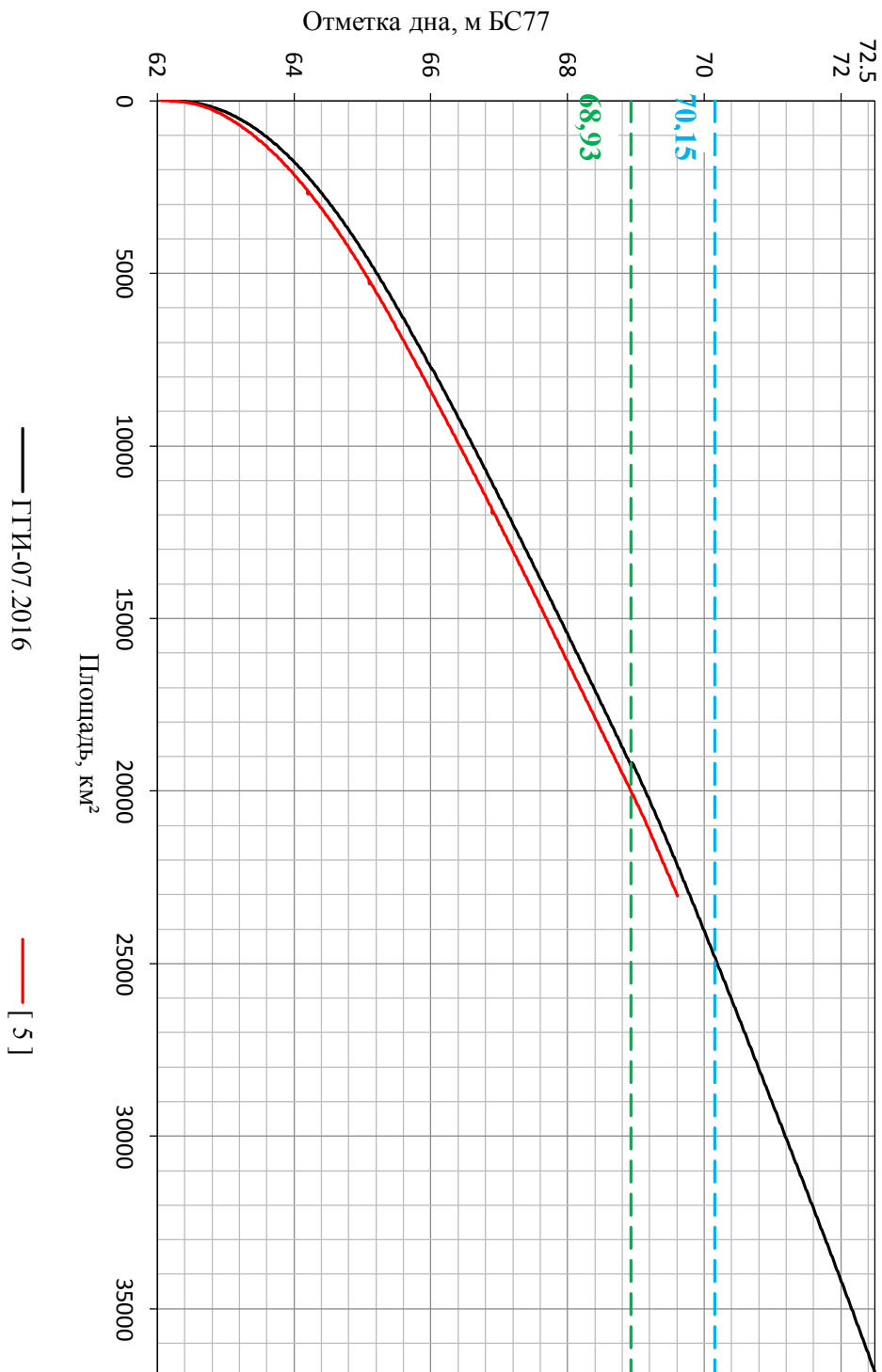


Рисунок 4.13 – Объемная кривая оз. Ханка

## **5. Хозяйственная деятельность в бассейне озера Ханка и на сопредельных территориях**

### **5.1 Оценка развития водохозяйственного комплекса по данным спутниковой информации**

Результаты космической съемки среднего и высокого разрешения несут в себе большую информативность и активно используются в сельском и лесном хозяйстве при инвентаризации и ревизии сельскохозяйственных и лесных карт; составлении прогнозных карт продуктивности и урожайности посевов; при учете площадей, занятых под те или иные сельскохозяйственные культуры; определении состояния почв в весенний период для установления начала проведения полевых работ и других мероприятиях.

По космическим снимкам ценную информацию получают для мелиоративных изысканий и водоснабжения; выявляют распространение осушительных, оросительных, обводнительных систем и результаты их применения.

В настоящем разделе выполнен анализ динамики площадей орошения земель, каналов, гидротехнических сооружений по данным ретроспективных космических снимков для китайской и российской частей территории бассейна оз. Ханка, включающий в себя решение следующих задач:

- подбор, анализ и предварительная обработка ретроспективных космических снимков ИСЗ серии LANDSAT с минимальной облачностью для российской и китайской частей территории бассейна озера с 1970-х годов до настоящего времени;
- разработка методики классификации изображений для получения тематических карт, содержащих информацию о пространственно-временных характеристиках рисовых оросительных систем (РОС) в границах выделенных полигонов;
- разработка методики классификации изображений для получения тематических карт, содержащих информацию о спектральных характеристиках исследуемых объектов (рисовых чеков в границах РОС);
- построение полигонов, включающих пиксели спутникового изображения, относящиеся к исследуемому классу, и расчёт их площадей;
- анализ полученных данных о многолетней динамике площадей орошения риса на российской и китайской территории;
- подбор современных космических снимков высокого разрешения гидротехнических сооружений (ГТС) на китайской территории бассейна оз. Ханка, осуществляющих подачу воды на РОС, сброс воды с них, а также переброску воды из реки Мулинхэ в бассейн оз. Ханка.

### 5.1.1 Исходные спутниковые данные и алгоритм их получения

Основным требованием к выбору источника исходной спутниковой информации было обеспечение данными долговременных наблюдений. При этом необходимо, чтобы получаемая в различные моменты времени информация, была унифицирована и позволяла строить и проводить анализ долговременных рядов данных. Наиболее подходящей системой, которая с одной стороны предоставляет качественную, хорошо калиброванную информацию, а с другой стороны имеет ряд наблюдений, длина которых исчисляется десятилетиями, является система спутников серии LANDSAT, запущенная в 1972 г. и обеспечивающая свободный доступ к данным, который осуществляется, в частности, через глобальную систему архивации данных LANDSAT Геологической службы США.

Учитывая тот факт, что на спутниках LANDSAT в разные годы функционировало разное по характеристикам оборудование, а исследования ретроспективных снимков должны были проводиться на основе максимального использования имеющейся информации, была проведена унификация данных, которая позволила получать многоспектральные изображения и производить математические операции с разными каналами спутниковой съемки. Спектральные характеристики каналов съемочных систем спутников серии LANDSAT приведены в *таблице 5.1*.

Таблица 5.1

Спектральные ХАРАКТЕРИСТИКИ каналов съемочных систем спутников серии LANDSAT

Спектральные каналы	Спектральные диапазоны, мкм	Применение
Мультиспектральный сканер: MSS		
1	0.50 – 0.60	Картографирование растительности, водных объектов
2	0.60 – 0.70	Один из наиболее важных каналов для картографирования типов растительности, а также определение границ почвенных и геологических контуров
3	0.70 – 0.80	Канал используется для оценки биомассы растительности на сцене, а также в ряде приложений, связанных с сельским хозяйством
4	0.80 – 1.10	Картографирование растительности
Тематические сканеры: TM; ETM+		
1	0.45 – 0.52	Канал, полезный для картографирования прибрежных водных поверхностей, дифференциации между почвой и растительностью, типами леса
2	0.52 – 0.60	Канал соответствует зеленой части спектра здоровой растительности, полезен при классификации различных объектов

Спектральные каналы	Спектральные диапазоны, мкм	Применение
3	0.63 – 0.69	Один из наиболее важных каналов для картографирования типов растительности, а также определение границ почвенных и геологических контуров
4	0.76 – 0.90	Канал используется для оценки биомассы растительности на сцене, а также в ряде приложений, связанных с сельским хозяйством
5	1.55 – 1.75	Канал, позволяющий детектировать количество воды в растениях, что полезно при оценке урожая и при проведении анализа состояния растительности
6	10.4 – 12.5	Канал, позволяющий проводить определение термального загрязнения и геотермальной активности
7	2.08 – 2.35	Канал, позволяющий определять тип геологических структур и почвенных границ, а также содержание влаги в растительности и почве
Сенсор: OLI		
1	0.433 – 0.453	Канал чувствителен к темно-синим и фиолетовым цветам. Позволяет определять побережья и аэрозоли
2	0.450 – 0.515	Канал, полезный для картографирования прибрежных водных поверхностей, дифференциации между почвой и растительностью, типами леса
3	0.525 – 0.600	Канал соответствует зеленой части спектра здоровой растительности, полезен при классификации различных объектов
4	0.630 – 0.680	Один из наиболее важных каналов для картографирования типов растительности, а также определение границ почвенных и геологических контуров
5	0.845 – 0.885	Диапазон измеряет ближний инфракрасный спектр. Эта часть спектра особенно важна для экологов, поскольку вода в листьях здоровых растений отражает ее. В сравнении с изображениями других диапазонов, позволяет точно измерять степень здоровья растений
6	1.560 – 1.660	Каналы покрывают разные участки коротко-волнового инфракрасного спектра. Позволяют отличать сухую землю от влажной, а также скалы и почвы, которые «выглядят» похоже в других диапазонах, но отличаются в ИК
7	2.100 – 2.300	
8	0.500 – 0.680	Панхроматический диапазон. Воспринимает больше света и дает самую четкую картинку среди всех диапазонов
9	1.360 – 1.390	Диапазон позволяет различать облака, которые представляют реальную проблему для спутниковых снимков, так как из-за размытых краев плохо различимы в обычных диапазонах (перистые облака)

### 5.1.2 Методика выделения на изображениях границ рисовых оросительных систем

При выделении на спутниковых изображениях границ полигонов, относящихся к классу РОС, задача заключалась в обнаружении на изображениях объектов и участков уже известных типов, являющихся характерными (типичными) представителями РОС на китайской и российской территориях бассейна оз. Ханка.

Для работы со спектральной информацией были использованы так называемые «индексные» изображения. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта строились изображения, соответствующие значению индекса в каждом пикселе, что и позволило выделить исследуемый объект и оценить его состояние [10].

В результате проделанной работы для каждого из исследуемых спутниковых изображений были получены векторные и растровые слои, обозначающие границы характерных РОС (рисунки 5.1), на которых на следующем этапе требовалось выделить рисовые чеки, заливаемые водой.

а)



б)

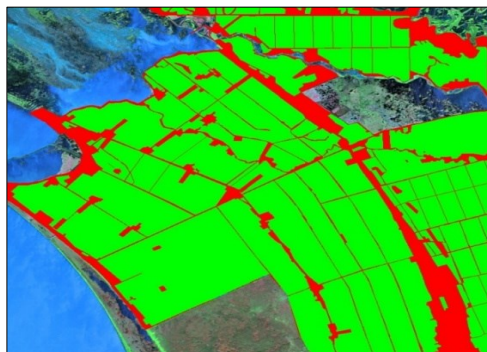


Рисунок 5.1 – Пример применения методики выделения на изображениях границ характерных РОС:  
а) Исходное цветосинтезированное изображение; б) Цветосинтезированное изображение с применением классификации

#### 5.1.2.1 Методика выделения рисовых полей

Уникальные физические свойства рисовых полей во время их затопления и самого риса в период созревания позволяют проследить динамику изменения индексов растительности, которая позволяет с большой точностью идентифицировать рисовые поля на фоне других сельскохозяйственных культур и естественной растительности (трава, деревья кустарники), когда они тоже заливаются водой во время паводков.

Отличительным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями

в отражении излучения разных длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее спектрально отражательными способностями позволяют использовать космические снимки для картографирования и идентификации типов растительности и их стрессового состояния [11].

Для детектирования рисовых полей также использовались «индексные» изображения, полученные на основе индексов:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности;
- EVI (Enhanced Vegetation Index) – расширенный индекс растительности;
- LSWI (Land Surface Water Index) – индекс поверхностных вод.

Точность обнаружения рисовых полей для северных территорий Китая с использованием этих индексов составляет порядка 94 %.

Комбинация указанных индексов в различных сочетаниях позволяет точно определить рисовые поля и качественно отобразить их для дальнейшего расчета площадей (рисунк 5.2).

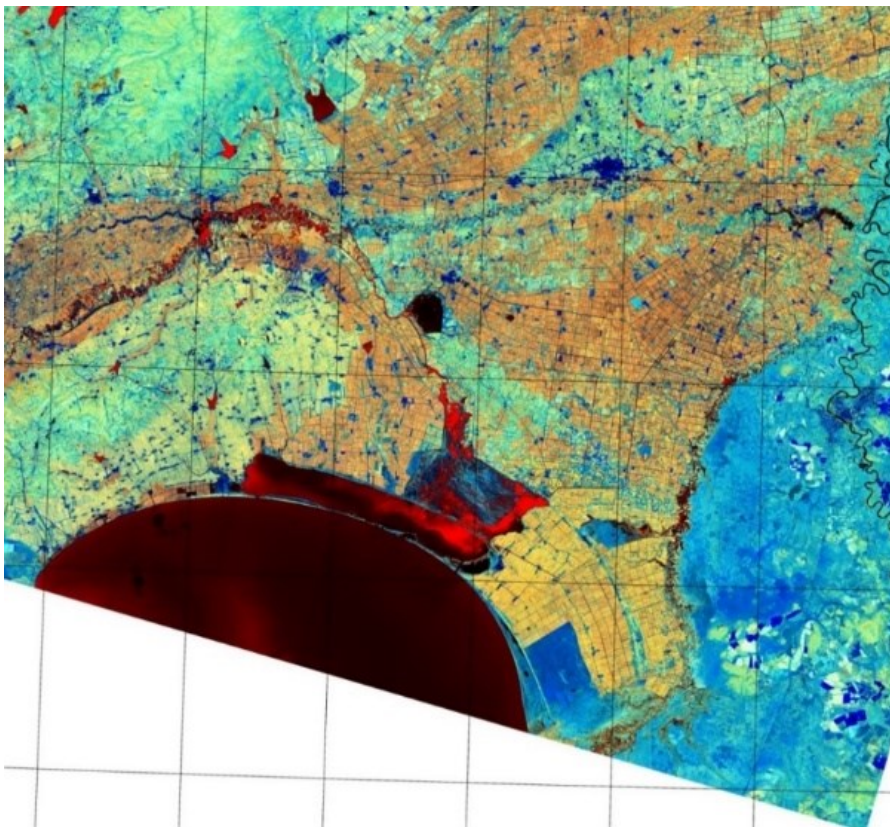


Рисунок 5.2 – «Индексное» изображение (синтез  $R/G/B=LSWI/NDVI/((NDVI+EVI)/2-LSWI)$ ) по данным LANDSAT 8 (OLI) 08.09.2015 г.

На рисунке наглядно видны рисовые поля, которые в синтезе RGB из сочетания индексов  $R=(LSWI)$ ,  $G=(NDVI)$ ,  $B=((NDVI+EVI)/2-LSWI)$  окрашиваются в оттенки светло-коричневых и оранжевых тонов [12].

#### 5.1.2.2 Расчет площадей РОС и рисовых чеков на них, залитых водой

При расчетах площадей характерных РОС и площадей рисовых чеков на этих РОС, залитых водой, для китайской части территории бассейна озера Ханка были выбраны два характерных района (*рисунок 5.3*), связанные с крупными объектами водохозяйственного комплекса:

а) р. Мулинхэ (MulingRiver) – канал Донгди (DongdiheCanal) – озеро Малая Ханка (LakeXiaoxingkai) (далее по тексту район 1);

б) озеро Малая Ханка (LakeXiaoxingkai) – р. Галатонг (GalatongRiver) – р. Сунгача (Song'achaRiver) (далее по тексту район 2).

На *рисунок 5.4* представлена сравнительная динамика площадей РОС по районам 1 и 2.



*Рисунок 5.3* – Районы, выбранные для проведения исследований



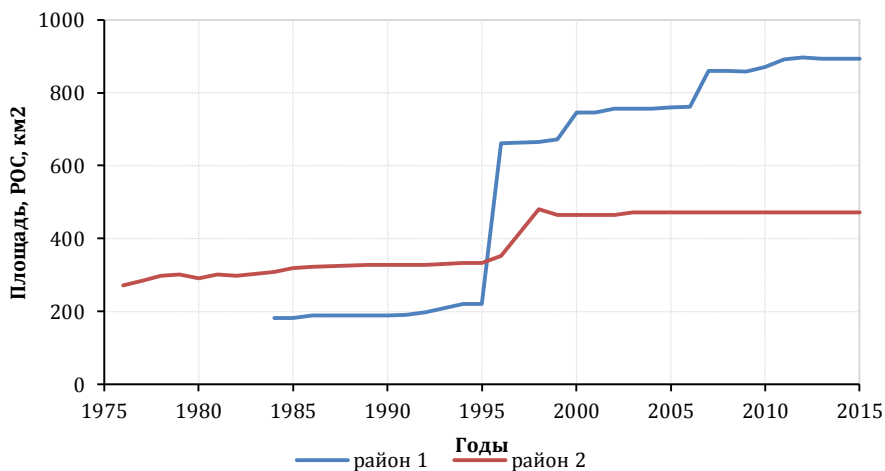


Рисунок 5.4 – Сравнительная динамика площадей РОС по районам 1 и 2

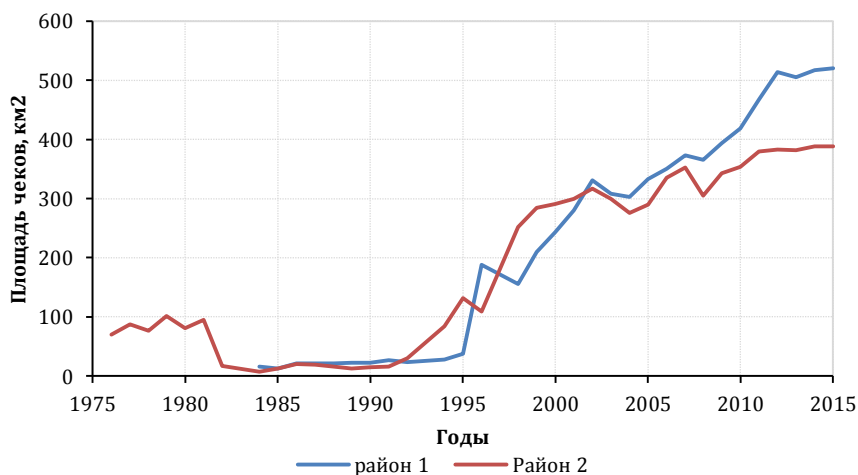


Рисунок 5.5 – Сравнительная динамика площадей чекеров по районам 1 и 2

Согласно статистике на исследуемых районах китайской части территории бассейна оз. Ханка применяют только заливной способ выращивания риса.

Для количественного учета площадей рисовых чекеров, залитых водой, к имеющимся в загруженном архиве спутниковым изображениям с 1984 по 2015 гг. была применена методика расчета, описанная в 5.1.2.

Для количественного учета площадей рисовых чекеров, залитых водой, к имеющимся в загруженном архиве спутниковым изображениям с 1976 по 1983 гг. был применен аналогичный подход, но, из-за невозможности расчета некоторых индексов в связи с отсутствием канала в коротковолновой инфракрасной области

спектра, в упрощенной форме. По текстурным характеристикам изображения были исключены пиксели, не являющиеся сельскохозяйственными полями (лес, природные водно-болотные угодья, водоемы).

На *рисунке 5.5* приведены значения рассчитанных площадей чеков по районам 1 и 2.

При расчете площадей характерных РОС и площадей рисовых чеков на этих РОС, залитых водой, для российской части территории бассейна озера Ханка были определены четыре характерных района, связанные с крупными центрами рисоводства на российской территории бассейна озера Ханка (*рисунком 5.6*).

Расчет площадей характерных РОС и площадей рисовых чеков на этих РОС, залитых водой, для российской части территории бассейна озера Ханка проводился аналогично расчетам по китайской территории, но с небольшими поправками.

Учитывая, что инфраструктура водохранилищ и гидротехнических сооружений оросительных систем в пределах указанных районов сформировалась до 1976 г., и при анализе временного ряда спутниковых изображений не выявлено значительных её изменений, суммарная площадь РОС за весь исследуемый период считалась постоянной (1147,9671 км<sup>2</sup>).

Согласно статистике, в Приморском крае эксплуатируется только небольшая часть от общей площади рисовых мелиоративных систем. Кроме этого, возделывание риса происходит по разным технологиям, в том числе и методом «сухого» выращивания. С целью формирования правильного понимания фактического вклада полей с заливной технологией выращивания риса в использовании водных ресурсов оз. Ханка были получены данные отдельно по площадям как чеков, залитых водой, так и чеков, где рис выращивается по «сухой технологии».



*Рисунок 5.6* – Районы проведения исследований на российской территории бассейна оз. Ханка

В *таблице 5.2* приведены значения рассчитанных площадей для чеков, залитых водой, и общая площадь чеков с учётом выращивания по «сухой технологии».

*Таблица 5.2*

Значения рассчитанных площадей для чеков, залитых водой, и общая площадь чеков с учётом выращивания по «сухой технологии»

Площадь чеков, залитых водой, кв.км		Общая площадь чеков, кв.км	
год	площадь	год	площадь
1985	423	1985	440
1989	334	1989	489
2001	25	2001	97
2002	82	2002	114
2003	42	2003	56
2007	27	2007	63
2008	82	2008	87
2011	176	2011	280
2014	196	2014	225
2015	225	2015	250

### 5.1.3 Анализ многолетней динамики площадей орошения риса на китайской территории

На основании проведенного анализа выделенных на ретроспективных спутниковых снимках характерных РОС и рисовых чеков на этих РОС, залитых водой, были обозначены четыре временных периода, на границах которых происходили качественные изменения в системе орошения рисовых полей на китайской территории бассейна озера Ханка.

*Обобщение результатов за период с 1976 г. по 1983 г.*

*Район 1.* Период характеризуется отсутствием явно выраженных водохранилищ и гидротехнических сооружений оросительных систем как звеньев этой системы в границах района. Система сельскохозяйственных угодий имеет структуру разделённых полей, которые интенсивно распаиваются, но, в основном, не используются под выращивание риса. Местоположение заливных рисовых полей не постоянно, лишь в редких случаях поля имеют чёткие границы. Разделения полей на горизонтальные площадки (чеки) на спутниковых снимках этого периода просматривается нечетко. Общая площадь заливных рисовых полей в течение периода изменяется незначительно (варьируется от 4,16 км<sup>2</sup> в 1982 году до 37,67 км<sup>2</sup>

в 1976 г.). Водоподача осуществляется по подводящим каналам от р. Мулинхэ, имеющим перегораживающие (гидротехнические узлы) гидроузлы (рисунок 5.7).

На спутниковых снимках в верхнем бьефе гидроузлов хорошо наблюдаются накопления воды для создания необходимых горизонтов воды в створах водозаборов к началу вегетационного периода.

Система распределительных каналов на спутниковых снимках этого периода просматривается нечётко. На снимках с 1980 по 1983 гг. виден магистральный канал и оградительная дамба для защиты от паводковых вод р. Мулинхэ и выхода воды из канала Донгди. Оградительная дамба проходит вдоль реки по правой кромке полей и далее опускается на юг параллельно каналу Донгди. Магистральный канал доходит до точки с координатами 45,535°с.ш. 132,567°в.д., где теряет признаки гидротехнического сооружения (рисунок 5.8).

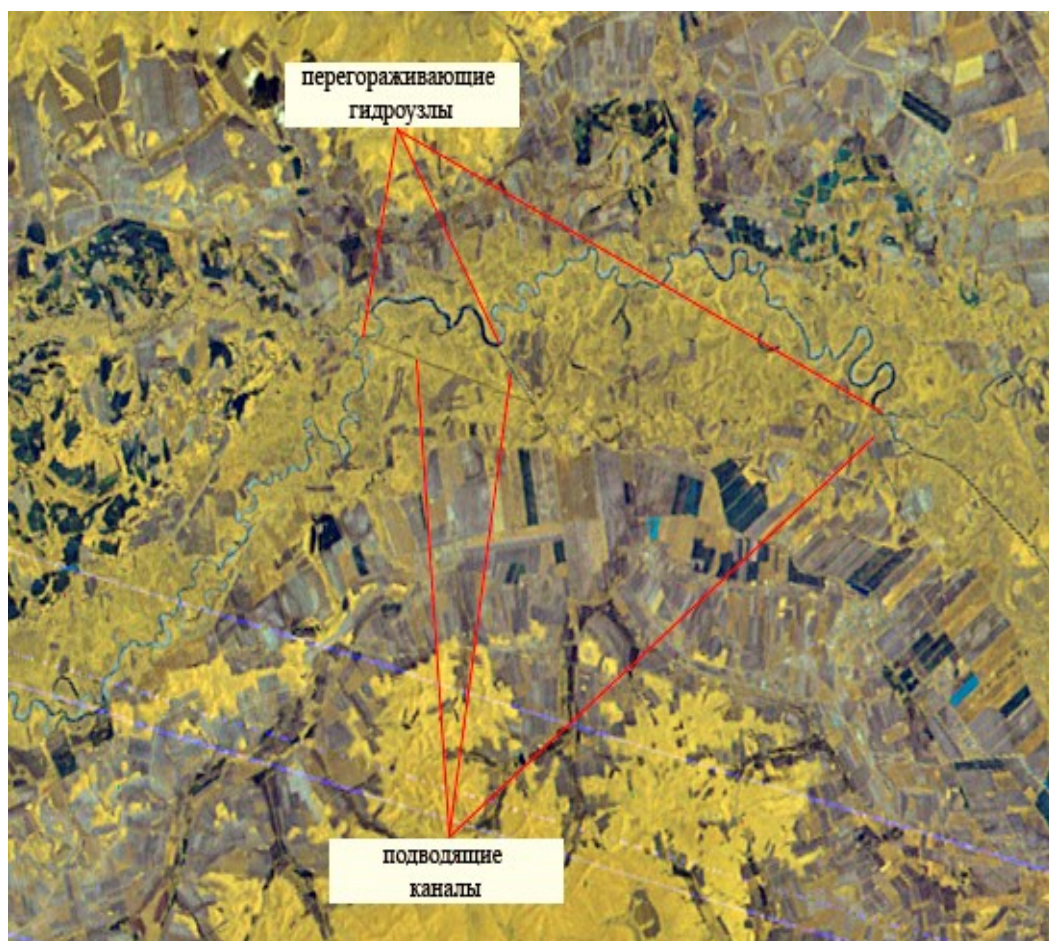


Рисунок 5.7 – Основные каналы в границах района по состоянию на 26.06.1977 г.

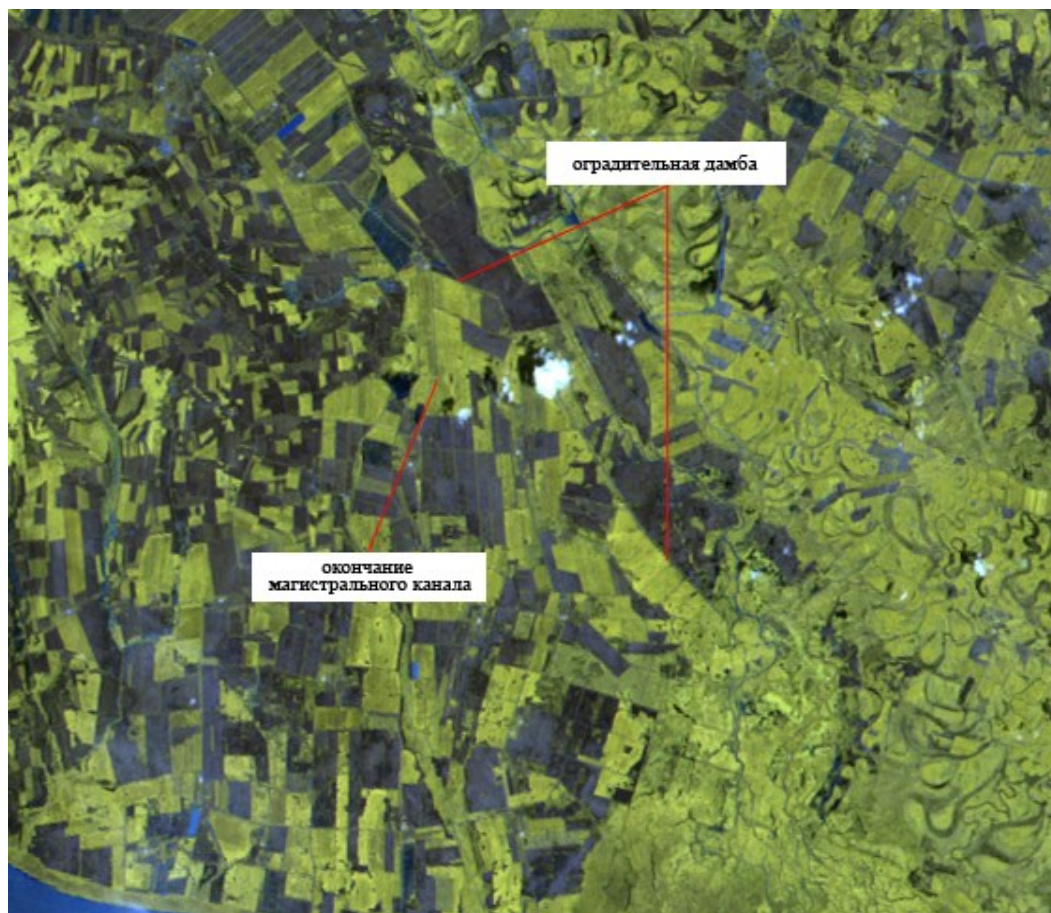


Рисунок 5.8 – Основные гидротехнические сооружения по состоянию на 23.06.1981 г.

*Район 2.* Период характеризуется отсутствием явно выраженных водохранилищ и слаборазвитой сетью гидротехнических сооружений оросительных систем как звеньев этой системы в границах района. Общая площадь заливных полей в течение всего периода изменяется незначительно (варьируется от 70,17 км<sup>2</sup> в 1976 г. до 100,57 км<sup>2</sup> в 1979 г.). Лишь в 1982 г. наблюдается значительное снижение площадей (до 16,65 км<sup>2</sup>). Местоположение заливных рисовых полей не постоянно, только 30 % полей имеют четкие границы и разделения на горизонтальные площадки (чеки). Водораспределение осуществляется по каналам, имеющим связь с озером Малая Ханка и реками Галатонг и Сунгача (рисунок 5.9).

Система распределительных каналов, осуществляющих водораспределение и водоотведение по массиву, на спутниковых снимках этого периода просматриваются нечетко.

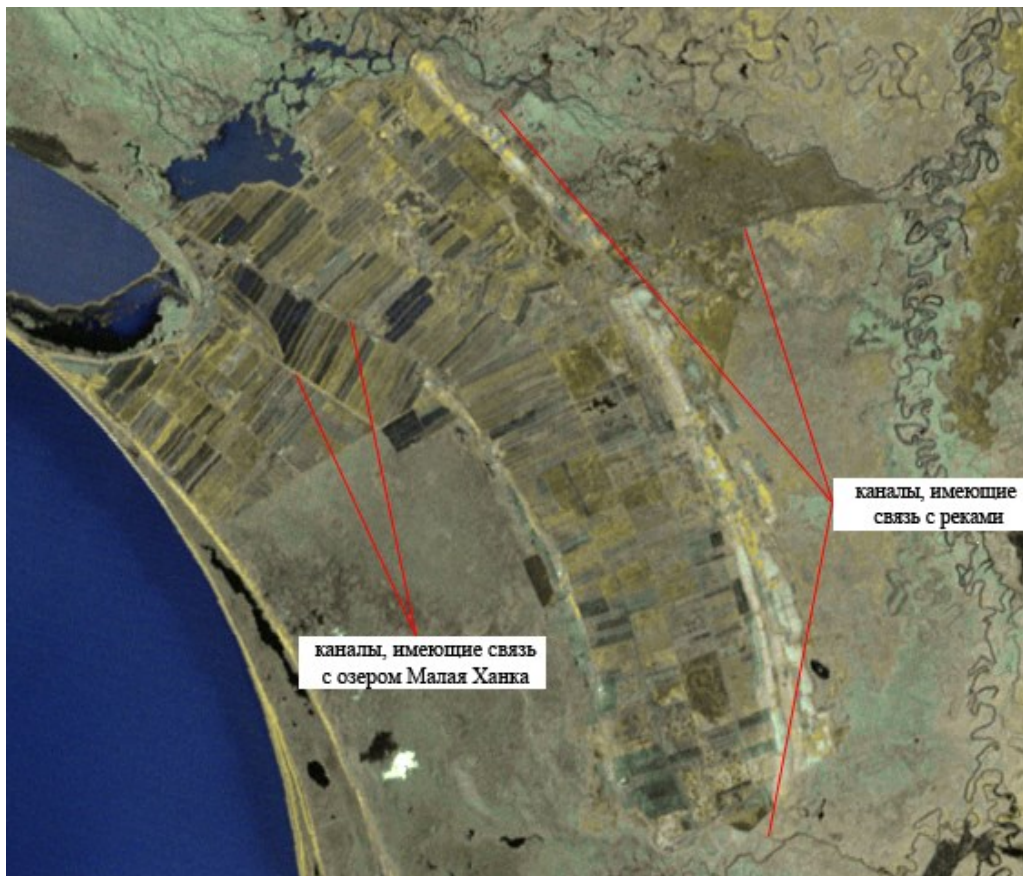


Рисунок 5.9 – Основные каналы в границах района 2 по состоянию на 22.05.1982 г.

Особые моменты, выявленные при анализе спутниковых снимков за период:

а) за все года этого периода р. Мулинхэ ниже по течению головного сооружения канала Донгди претерпевает незначительные изменения, как по ширине русла, так и по водности относительно участка реки до перегораживающих гидроузлов;

б) на снимке за 1980 г. просматривается начало строительства дамбы обвалования вокруг будущего водохранилища Циншань (QingshanReservoir). К концу периода дамба построена по контуру водохранилища и далее на юг до точки с координатами 45,403° с. ш. 132,744° в. д.;

в) канал Донгди имеет хорошо выраженную структуру до широты 45,51° с. ш., далее просматриваются признаки подачи воды самотеком: частично в оз. Малая Ханка, частично через водно-болотные угодья, связанные с озером Донгбэй (DongbeiLake);

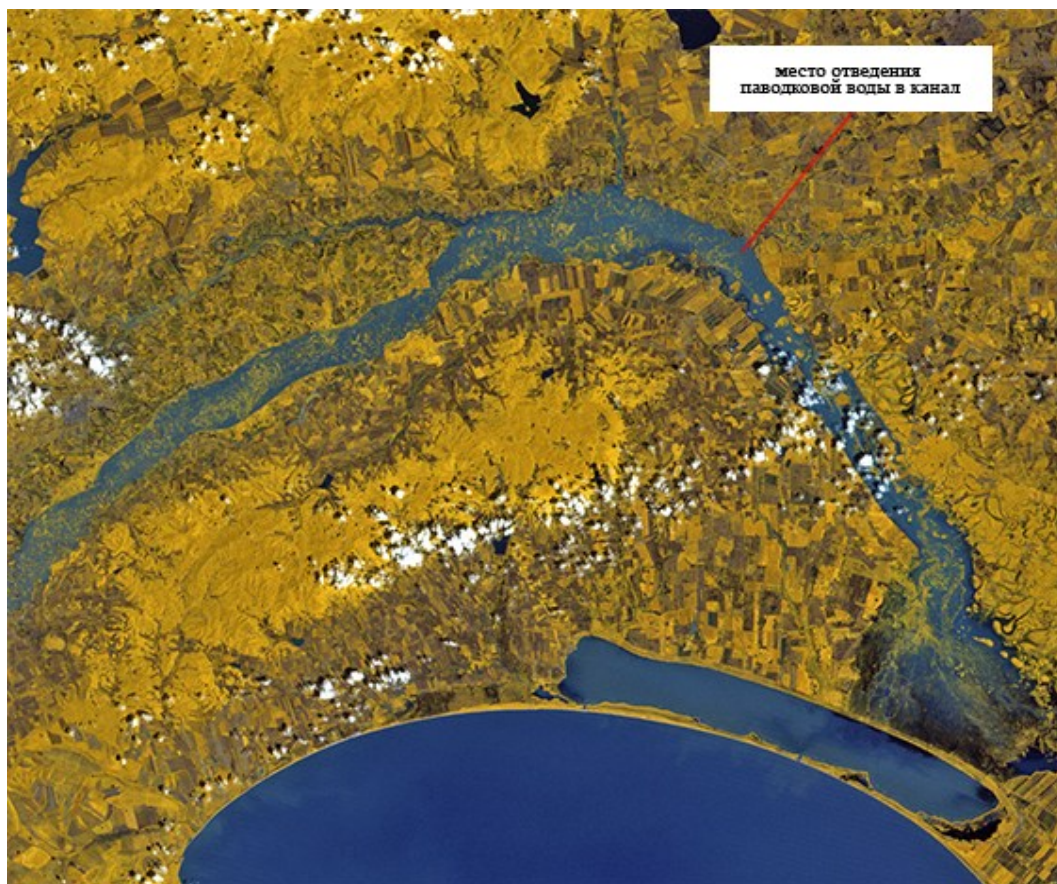


Рисунок 5.10 – Разлив р. Мулинхэ на снимке за 11.07.1981 г.

г) года 1980 и 1981 характеризуются повышенной водностью, а на снимке за 11.07.1981 г. наблюдается значительное подтопление поймы р. Мулинхэ до защитной дамбы, уходящей в сторону строящегося водохранилища Циншань. Паводковая вода перенаправлена в канал Донгди, в результате чего произошло затопление участка между защитными сооружениями по обе стороны канала (рисунок 5.10).

Характерные ровные края подтопленной зоны указывают на наличие защитных сооружений и дают возможность оценить протяжённость дамбы по обе стороны подтопленного района.

*Обобщение результатов за период с 1984 г. по 1993 г.*

*Район 1.* Период характеризуется появлением в верхней части района систематизации в использовании сельхозугодий под выращивание риса, однако общая площадь заливных рисовых полей по сравнению с предыдущим периодом увеличилась незначительно (варьируется от 13,36 км<sup>2</sup> в 1985 г. до 26,37 км<sup>2</sup> в 1991 г.).

Местоположение заливных рисовых полей в течение периода практически постоянно, большинство полей имеют чёткие границы, разделенные полевыми дорогами.

Система водораспределения существенных изменений не претерпела, протяженность магистрального канала увеличилась и достигла в 1984 г. точки с координатами  $45,514^{\circ}$  с. ш.  $132,563^{\circ}$  в. д., с дальнейшим отведением в сторону канала Донгди. Благодаря этому, здесь также появились отдельные заливные рисовые поля.

На снимках наблюдаются искусственно создаваемые накопители-отстойники, которые в течение периода появляются в непосредственной близости от заливных полей (рисунки 5.11).

При визуальном сравнении снимков за 1984 и 1992 гг. наглядно видно строительство на месте залитых водой котлованов системы упорядоченных накопителей-отстойников.

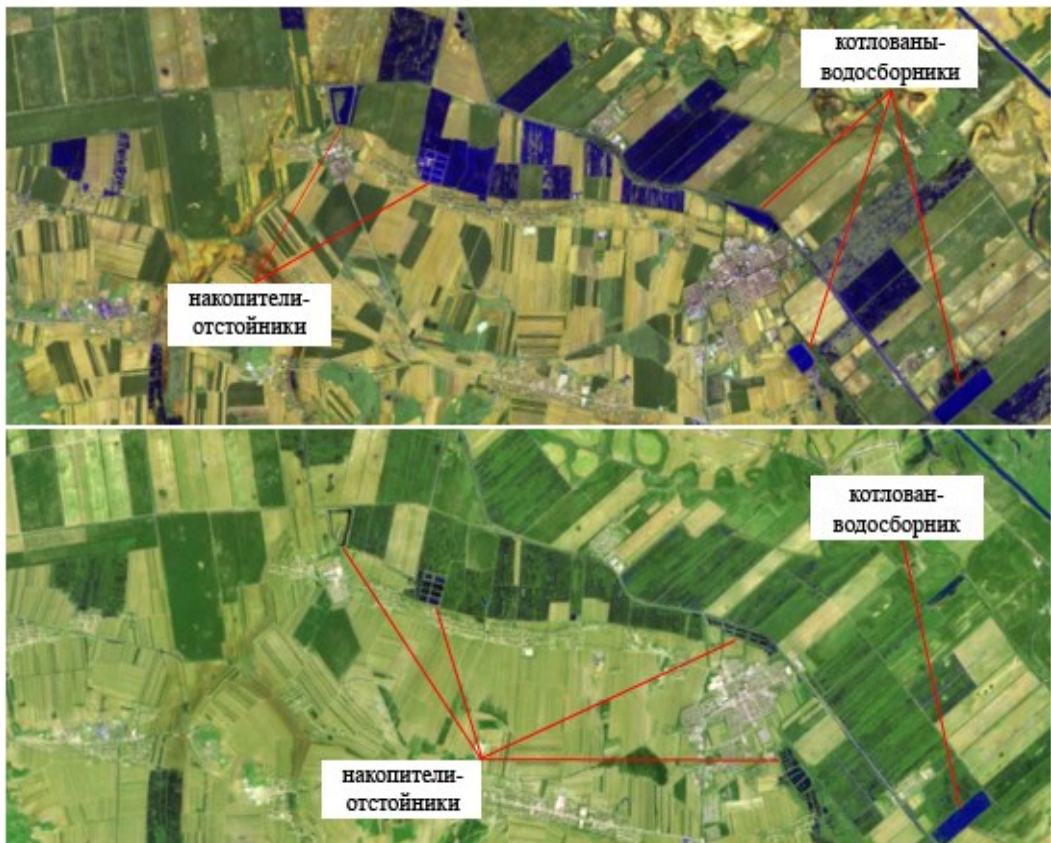
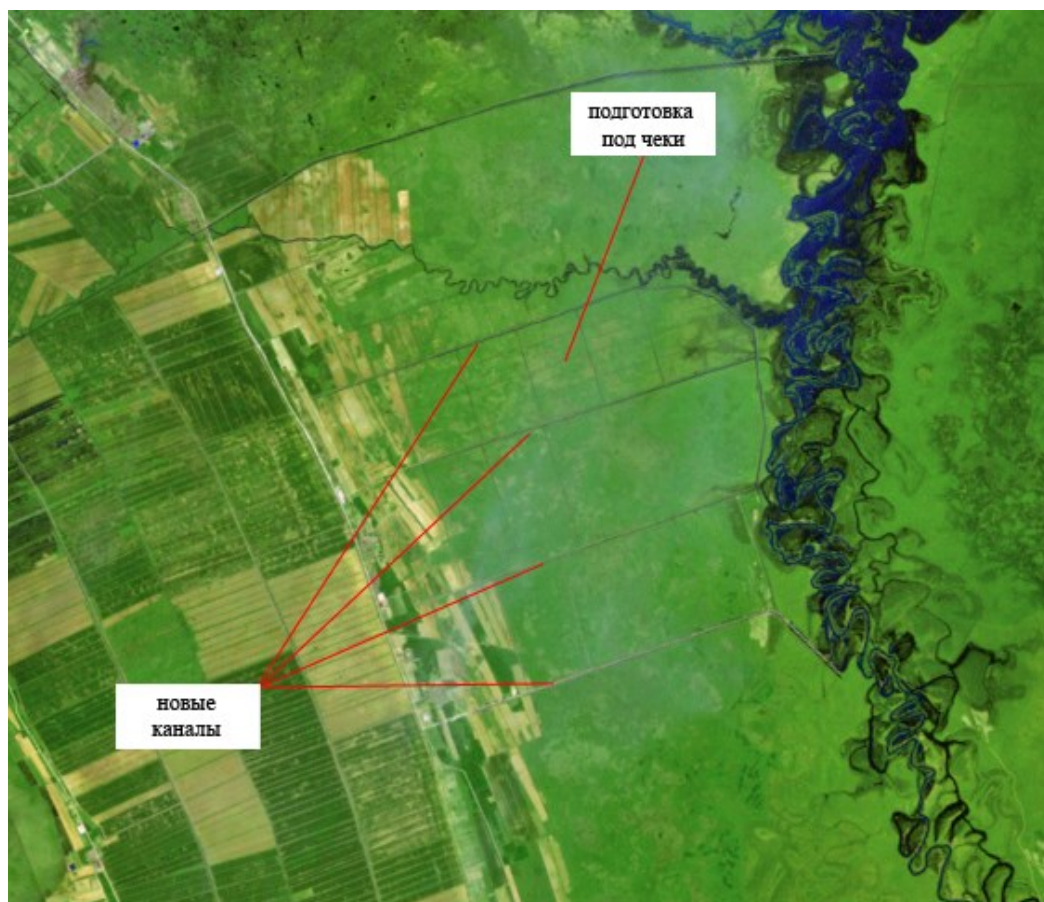


Рисунок 5.11 – Сооружения водосбора  
(сверху за 14.06.1984 г., снизу за 06.07.1992 г.)



*Район 2.* Площадь заливных рисовых полей в течение периода изменяется незначительно (варьируется от 6,69 км<sup>2</sup> в 1984 г. до 29,81 км<sup>2</sup> в 1992 г.). Заливаются только поля, расположенные вдоль магистрального канала, идущего от гидротехнического сооружения между озёрами Малая Ханка и Донгбэй. К северу от магистрального канала наблюдается распределительная сеть каналов с выходами в реки Галатонг и Сунгача. Площадь РОС увеличилась за счёт появления дополнительных каналов к реке Сунгача. На снимках за период просматривается разделение участка в границах этих каналов на горизонтальные площадки (будущие чеки) (*рисунок 5.12*).



*Рисунок 5.12* – Увеличение РОС в границах района 2 на снимке за 06.07.1992 г.

Особые моменты, выявленные при анализе спутниковых снимков за период:

а) В 1985 г. из р. Мулинхэ стала поступать вода в водохранилище Циншань. Начата активная разработка сельскохозяйственных угодий к востоку от водохранилища.

б) За все года рассматриваемого периода р. Мулинхэ ниже по течению головного сооружения канала Донгди претерпевает незначительные изменения.

в) Появились отдельные заливные рисовые поля в нижней части района 1. Количество каналов, связывающих распределительную сеть этой части района с оз. Малая Ханка, значительно увеличилось.

г) В 1986 г. от места окончания оградительной дамбы района 1 проведен искусственный канал в оз. Малая Ханка (рисунок 5.13).

д) В 1984 г. в районе головного сооружения канала Донгди от р. Мулинхэ проведено дополнительное ответвление, соединяющее реку с каналом.

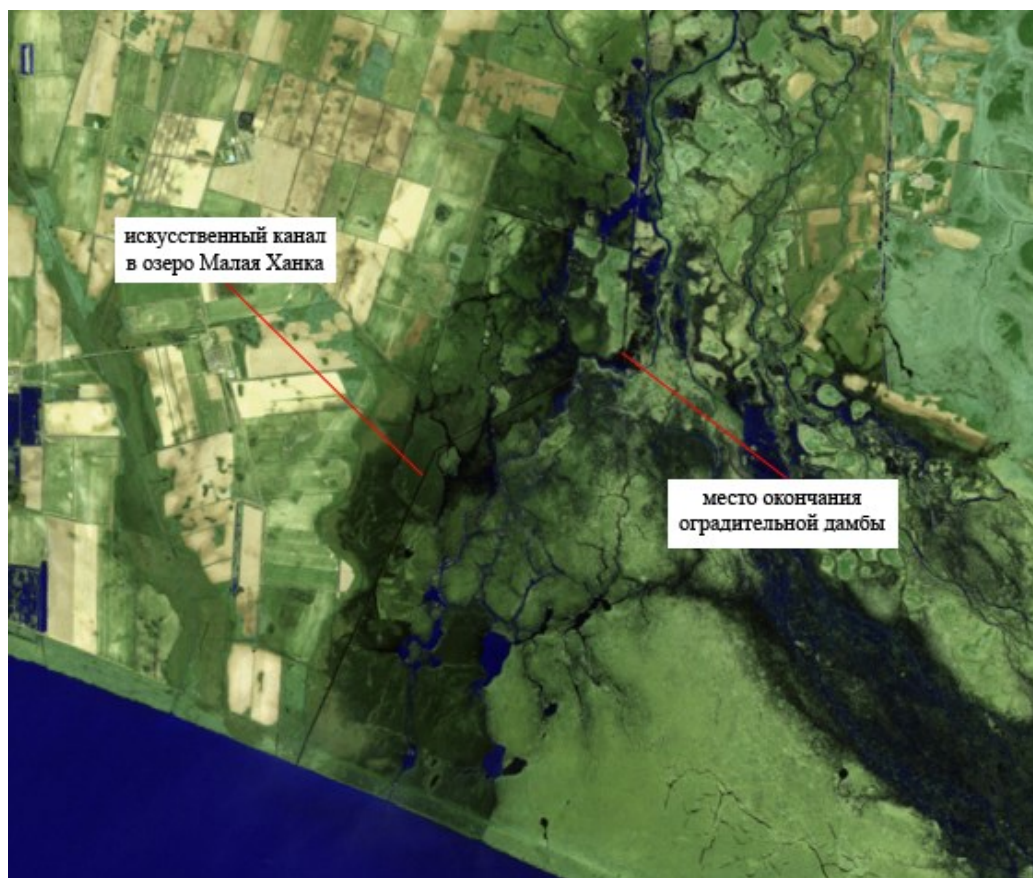


Рисунок 5.13 – Искусственный канал в оз. Малая Ханка на снимке за 04.06.1986 г.

#### *Обобщение результатов за период с 1994 по 2005 гг.*

*Район 1.* Период характеризуется интенсивным ростом площадей сельхозугодий, используемых под выращивание риса, развитием оросительной инфраструктуры и систем водоподачи и водоотведения. В 1994 г. оградительная дамба вдоль канала Донгди была достроена до оз. Малая Ханка, магистральный канал доведен

до оградительной дамбы и далее пущен вдоль неё с выходом в оз. Малая Ханка. Одновременно с этим началась активная разработка сельхозугодий вдоль канала, соединяющего водохранилище внутри района (RRA Reservoir) с оз. Малая Ханка и вдоль самого озера. В период с 1995 по 1998 гг. здесь в пять раз увеличилась площадь заливных рисовых чеков (с 37,78 км<sup>2</sup> в 1995 г. до 187,96 км<sup>2</sup> в 1998 г.). В дальнейшем прирост площади заливных рисовых чеков имел ровный ход с динамикой в среднем 50 км<sup>2</sup> в год и составил в 2005 г. 333,15 км<sup>2</sup>. Большинство полей в границах района приобрели ярко выраженные контуры разделения рисовых карт на чеки (рисунки 5.14).



Рисунок 5.14 – Водораспределительная система на снимке за 04.05.1998 г.

*Район 2.* Период характеризуется интенсивным ростом заливных полей, а начиная с 1999 г., чеки заливаются водой на 90 % рисовых полей района. Наиболее резкий скачок в увеличении площадей заливных рисовых чеков наблюдается в период с 1996 по 1998 гг. (со 109,2 км<sup>2</sup> в 1996 г. до 251,7 км<sup>2</sup> в 1998 г.).

Площадь РОС увеличилась в 1998 г. за счет полного освоения всей свободной территории, ограниченной реками Галатонг и Сунгача. Далее площадь РОС изменений не претерпевала.

В 1995 г. оградительная дамба, идущая от водохранилища Циншань, была достроена до реки Галатонг и соединена с дамбой, идущей от полей восточнее водохранилища Циншань (рисунок 5.15).

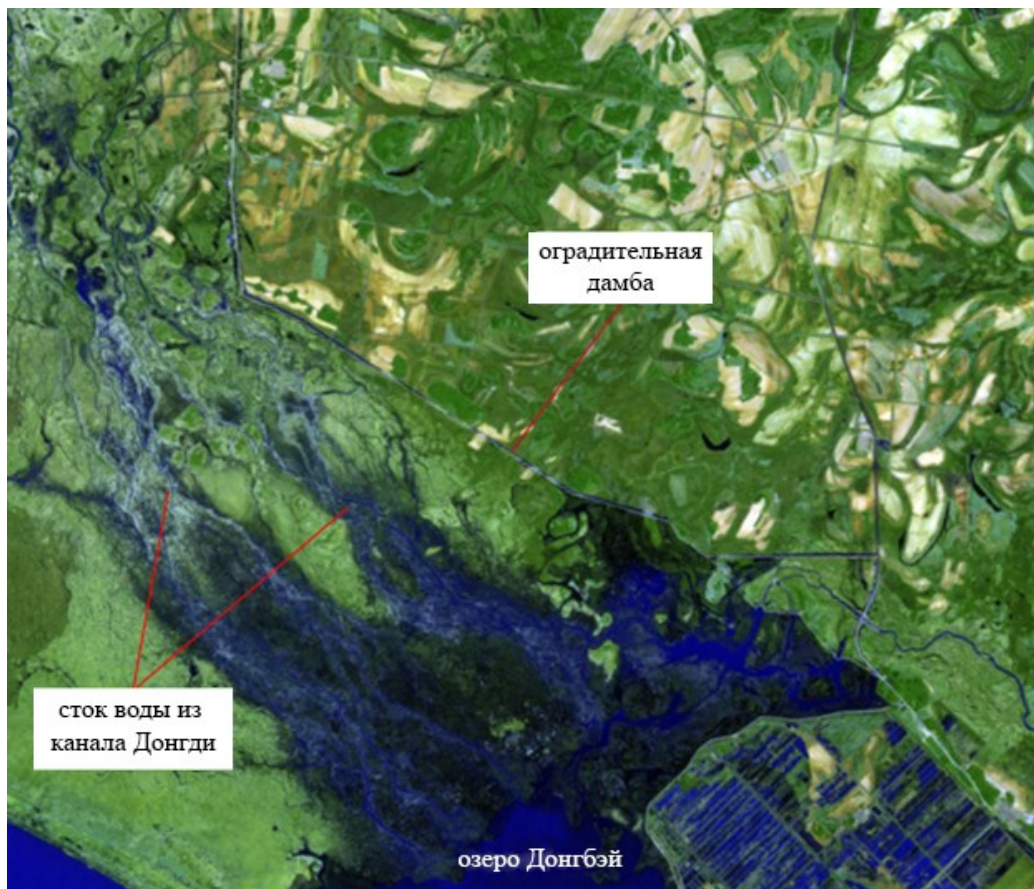


Рисунок 5.15 – Завершение строительства оградительной дамбы 28.05.1995 г.

Таким образом, рисовые поля как районов 1 и 2, так и района к востоку от водохранилища Циншань оказались полностью защищены от разлива воды в районе водно-болотных угодий к северу от оз. Малая Ханка.

Особые моменты, выявленные при анализе спутниковых снимков за весь рассматриваемый период:

а) С 1995 г. прирост сельскохозяйственных угодий к востоку от водохранилища Циншань увеличился вдвое.

б) В 2001 г. строящийся канал между оз. Донгбэй (в районе водноболотных угодий к северу от оз. Малая Ханка) и полями к востоку от водохранилища Циншань соединился (рисунок 5.16).

в) Начиная с 1998 г., в районе отведения канала Донгди в сторону водохранилища Циншань наблюдаются периодические накопления воды для создания повышенных горизонтов воды в створах водозаборов. Выявить по имеющимся ретроспективным снимкам LANDSAT наличие ГТС в районе отведения не представляется возможным.

г) Ширина русла р. Мулинхэ ниже по течению «головы» канала Донгди начиная с 2001 года визуалью уменьшилась.



Рисунок 5.16 – Завершение строительства канала 12.05.2001 г.

#### *Обобщение результатов за период с 2006 по 2015 гг.*

*Район 1.* Период характеризуется поступательным ростом площадей сельхозугодий, используемых под выращивание риса, за счёт их освоения в центральной части района и между оградительными дамбами в районе водохранилища Циншань. Площадь РОС при этом растет незначительно – на 132,7 км<sup>2</sup> за весь период. Площадь заливных рисовых чеков за период увеличилась с 333,15 км<sup>2</sup> до 519,96 км<sup>2</sup>. Все рисовые чеки в границах РОС заливаются из года в год без, так называемого, «отдыха» полей.

*Район 2.* Площади РОС и чеков, залитых водой, за весь период претерпевает минимальные изменения, в основном все рисовые чеки в границах района ежегодно заливаются водой.

Особые моменты, выявленные при анализе спутниковых снимков за период:

а) Прирост сельскохозяйственных угодий к востоку от водохранилища Циншань достиг максимума, вся пригодная к возделыванию риса территория освоена и ежегодно заливается водой.

б) Начиная с 2008 года, в мае-начале июня наблюдаются случаи интенсивного сброса воды из р. Мулинхэ по каналу Донгди в район водно-болотных угодий в районе оз. Донгбэй и затопление этого района (*рисунок 5.17*).

в) Вода, сбрасываемая в район водно-болотных угодий, частично уходит в канал, соединяющий их с полями к востоку от водохранилища Циншань. Это наглядно видно по снимку высокого разрешения (*рисунок 5.18*), где имеет место понижение уровня высоты ниже ГТС и наблюдается сброс воды в канал.

г) В то же время наблюдается поступление излишков воды и в оз. Малая Ханка, а также наличие выноса воды в оз. Малая Ханка, как с подтопленного района водно-болотных угодий, так и напрямую с полей районов 1 и 2.

На снимках прослеживается дальнейший сброс воды из оз. Малая Ханка в оз. Ханка.



*Рисунок 5.17* – Затопление водно-болотных угодий в районе оз. Донгбэй



Рисунок 5.18 – Район ГТС, регулирующего сброс воды в канал

На *рисунках 5.19 и 5.20* видно, что вода не только сбрасывается с полей в оз. Малая Ханка через ГТС, но и поступает (просачивается) через дамбу, о чем свидетельствует наличие темной полосы воды вдоль дамбы со стороны озера. Предполагается, что эта вода более чистая, поскольку прошла через фильтр, роль которого в данном случае играет грунт дамбы. На этих же снимках видно, что вода из оз. Малая Ханка сливается в оз. Ханка: на *рисунке 5.19* – по восточному ГТС, на *рисунке 5.20* – по западному ГТС.

На *рисунках 5.21 и 5.22* видно, что вода с полей переливается через дамбу в озеро Малая Ханка, о чем свидетельствуют нечеткие контуры дамбы, местами имеющие цвет воды, и наличие вдоль побережья оз. Малая Ханка воды с взвешьями, а затем направляется в оз. Ханка: на *рисунке 5.21* – через восточное ГТС и на *рисунке 5.22* – через западное.

При проведении работ по анализу ретроспективного ряда спутниковых снимков был выявлен еще один район рисосеяния на территории КНР, играющий свою роль в системе водосбора оз. Ханка. Этот район находится к западу от оз. Малая Ханка на северо-западной периферии оз. Ханка.



*Рисунок 5.19* – Просачивание воды через дамбу в оз. Малая Ханка и вынос через восточное ГТС в оз. Ханка



*Рисунок 5.20* – Просачивание воды через дамбу в оз. Малая Ханка и вынос через западное ГТС в оз. Ханка





*Рисунок 5.21* – Перелив воды через дамбу в оз. Малая Ханка и вынос через восточное ГТС в оз. Ханка



*Рисунок 5.22* – Перелив воды через дамбу в оз. Малая Ханка и вынос через западное ГТС в оз. Ханка

Структура района начинает просматриваться с 1995 г. Район постепенно развивается как по инфраструктуре, так и по количеству полей, заливаемых водой (рисунк 5.23).



Рисунок 5.23 – Дополнительный район на китайской части территории бассейна

На *рисунке 5.24* приведены значения рассчитанных по годам площадей РОС указанного района.

Система орошения полей этого района осуществляется с двух сторон: закачка воды из оз. Ханка и питание водами малых рек, берущих начало на возвышенности северо-западнее района. Сброс воды с полей осуществляется в оз. Ханка.

Площадь чеков, заливаемых водой, в дополнительном районе имеет устойчивый тренд к повышению на 3–5 км<sup>2</sup> в год.

На *рисунке 5.25* представлена динамика площадей чеков, заливаемых водой по годам. Таким образом, разработанные методики позволили выделить характерные РОС и рисовые чеки, заливаемые водой, и провести исследования динамики многолетних изменений их площадей на китайской и российской территориях бассейна оз. Ханка.

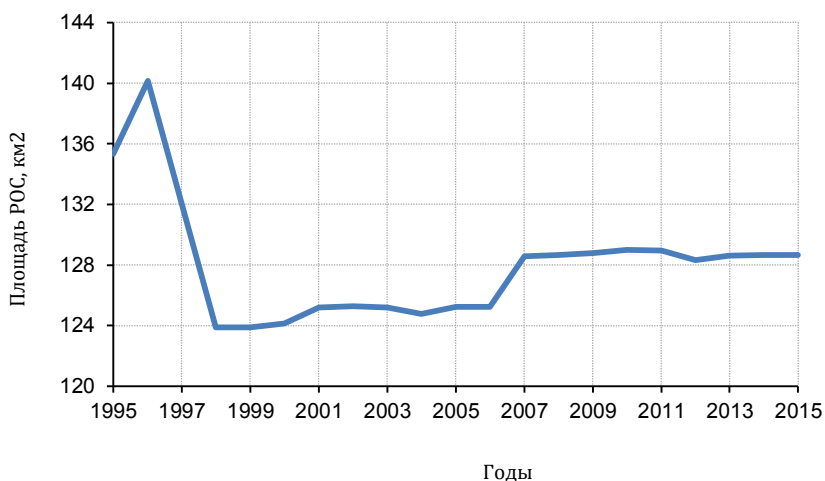


Рисунок 5.24 – Динамика площадей РОС дополнительного района

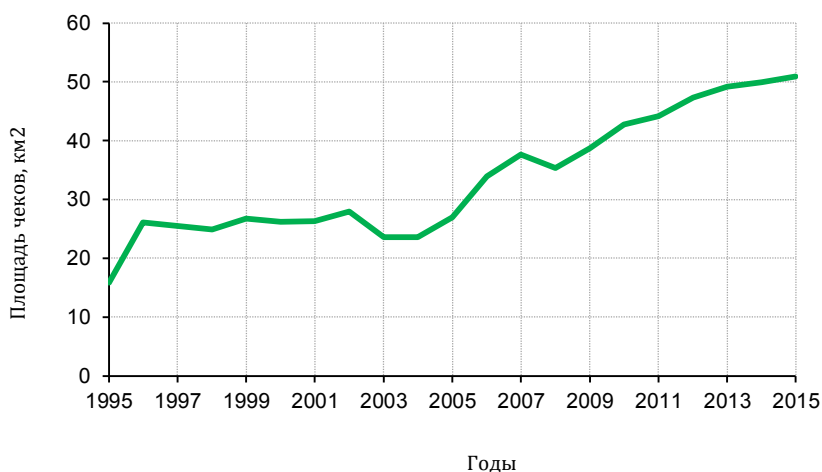


Рисунок 5.25 – Динамика площадей чеков, заливаемых водой, дополнительного района

Полученные результаты наглядно отражают устойчивый тренд увеличения площадей территорий, используемых под выращивание риса на китайской стороне бассейна оз. Ханка, и незначительный тренд к увеличению рисовых полей, намечившийся с 2010 г., на российской стороне. По статистике с 2007 г.

Для китайской территории прирост рисовых полей, заливаемых водой, увеличился за период 1976–2015 гг. с 107,85 км<sup>2</sup> до 908,07 км<sup>2</sup>, прирост осуществлялся постепенно в прямой зависимости от ввода в строй гидротехнических сооружений,

позволяющих начать выращивание риса на той, или иной территории в границах (исследуемых районов. Для российской территории, где система гидротехнических сооружений была введена в эксплуатацию задолго до начала исследуемого периода, (со второй половины 1970-х годов) площади рисовых полей, в том числе и заливных, напрямую связаны с политическими и экономическими процессами, происходящими в стране. Площади рисовых полей, составляющие к концу 80-х годов прошлого столетия около 500 км<sup>2</sup>, сократились с распадом СССР до 55 км<sup>2</sup> и только с 2010 г. наметилась тенденция к возврату к прежним позициям. На 2015 г. площадь рисовых полей составляет 250,36 км<sup>2</sup>, по статистике 196 км<sup>2</sup>.

Анализ спутниковых снимков показал, что после окончания строительства защитных сооружений вдоль канала Донгди (1995 г.) и системы водоотведения излишков воды, поступающей через канал, на орошение полей восточнее водохранилища Циншань (2001 г.), поступление воды из р. Мулинхэ в район водно-болотных угодий севернее оз. Малая Ханка через канал Донгди стало намного интенсивнее, чем в предыдущие годы. Снимок высокого разрешения района «головой» канала Донгди не показал наличия в районе «заворота» р. Мулинхэ в канал Донгди какого-либо ГТС, но позволил оценить, насколько ширина русла канала Донгди (125 м) и дополнительного ответвления в него из р. Мулинхэ (62 м) превосходит параметры самого русла р. Мулинхэ ниже по течению (10 м).

Установлено, что ширина створа канала Донгди в месте заведения в него вод р. Мулинхэ (125 м) (по другим данным 60 м. см. ниже) в два с половиной раза превосходит ширину створа канала, отводящего воду из водно-болотных угодий в районе оз. Малая Ханка на орошение полей на северо-востоке (52 м).

Территория района водно-болотных угодий севернее оз. Малая Ханка последние восемь лет затопляется в мае-июне ежегодно, излишки воды поступают, в том числе, и в оз. Малая Ханка, а через него – в оз. Ханка. Рост количества рисовых полей в районах 1 и 2, а также дополнительно выявленного района одновременно привел к увеличению каналов, связывающих поля этих районов с озерами Малая Ханка и Ханка.

## 5.2 Хозяйственная деятельность на российской части бассейна озера Ханка

### 5.2.1 Общая характеристика социально-экономических условий

Хозяйственное освоение российской части бассейна оз. Ханка началось с середины XIX века, когда по Айгунскому договору 1858 г., установившему русско-китайскую границу по реке Амур, часть маньчжурских территорий, в том числе современный Приморский край, отошли в 1859 г. к России, и на границе с Китаем в Турьем Роге был установлен пограничный пост.

С начала заселения бассейна оз. Ханка и до настоящего времени – это регион, имеющий, главным образом, сельскохозяйственное назначение. Из всего населения – около 200 тыс. человек, 80 % составляют сельские жители. Городское население сосредоточено в основном, в г. Спасск-Дальнем, главном административном центре бассейна оз. Ханка.

Административное деление территории в бассейне оз. Ханка приведено в *таблице 5.7* [13].

*Таблица 5.7*

Административное деление территории в бассейне оз. Ханка

№ на карте	Название	Население, человек (на начало 2016 г.)	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Плотность, чел./км <sup>2</sup>	Административный центр
Городской округ					
IX	Спасск-Дальний	41 539	0,05	1161,7	
Муниципальные районы					
7	Михайловский	30 954	2,7	13,7	село Михайловка
12	Пограничный	22 560	3,7	6,9	пгт Пограничный
14	Спасский	28 199	4,1	7,5	город Спасск-Дальний
16	Ханкайский	22 563	2,7	10,5	село Камень-Рыболов
18	Хорольский	28 011	1,97	17,2	село Хороль
19	Черниговский	33 659	1,8	20,5	село Черниговка

Плотность населения в российской части бассейна – около 15.3 человек на кв. км. Начиная с середины 90-х годов прошлого века отмечается повсеместное уменьшение численности населения во всех административных районах. Изменение численности населения (тыс. человек) за период с 1970 до 2015 гг. представлена в *таблице 5.8* [14].

Таблица 5.8

Динамика численности населения, тыс. человек, в административных районах, расположенных в пределах бассейна озера за период с 1970 до 2015 гг.

Административный район	Площадь, км <sup>2</sup>	Годы						
		1970	1985	1995	1998	2010	2013	2015
Михайловский включая городское	2741,4	33,0	40,2	43,8	42,4	34,4 7,8	32,9 7,7	30,9
Пограничный включая городское	3750,0	23,7	25,1	27,0	24,8	23,5 10,3	23,0 10,1	22,5
Спасский включая городское (г. Спасск-Дальний)	4140,0	78,2	88,7	94,0	89,6	75,2 44,7	29,3	69,7 41,5
Ханкайский включая городское	2689,0	28,8	28,6	29,8	27,8	24,7 0	23,7 0	22,5 0
Хорольский, включая городское	1968,6	36,6 7,1	38,5 10,3	43,0 12,3	40,7 11,8	30,3 9,1	29,1 9,0	28,0
Черниговский включая городское	1870,0	41,3 12,8	45,0 14,6	46,5 15,5	46,9 15,4	36,2 8,7	34,9 8,5	33,6
Всего								207,2

### 5.2.2 Использование водных ресурсов в бассейне озера Ханка

Водные ресурсы оз. Ханка используются, главным образом, в сельском хозяйстве и в значительно меньших объемах в промышленности и коммунальном секторе экономики.

Среди антропогенных факторов, влияющих на водный баланс, водные ресурсы и гидрологический режим озера, сельское хозяйство, и в первую очередь, орошаемое земледелие, является приоритетным, развитие которого непосредственно связано с использованием водных ресурсов.

Наличие водных и земельных ресурсов Приханкайской низменности, жаркая погода летом, обильные дожди в период вегетации, тяжелые незасоленные почвы послужили благоприятными условиями для возделывания здесь риса, одной из наиболее водоемких культур. Его посевы получили широкое распространение как на российской части бассейна, так и в Китае. В пределах РФ выращивание риса осуществляется в 4 районах: Ханкайском, Хорольском, Черниговском и Спасском.

Основными показателями при оценке развития и состояния ирригации, а также объемов используемой для этих целей воды являются величины площадей орошаемых земель. При этом обычно используются две их категории: наличие земель с оросительной сетью и фактически политые земли. Именно в пределах фактически политых земель формируются безвозвратные потери водных ресурсов, характеризующие степень влияния орошения на водные ресурсы бассейна.

### 5.2.2.1 Развитие и состояние орошаемого земледелия

В бассейне оз. Ханка начальный период регулярного рисосеяния относится к середине 1920-х годов. Первые посевы риса тогда стали культивироваться в Спасском и Ханкайском районах. Осваиваемые участки располагались на заболоченных землях Приханкайской низменности, которые предварительно осушались. Источником орошения служил сток рек, стекающих в озеро. Попытки дальнейшего расширения посевов риса с использованием речного стока не дали положительного результата. Вследствие этого на российской части бассейна оз. Ханка в течение нескольких десятилетий площади рисосеяния не претерпевали изменений и не превышали 2–3 тыс. га.

Оценка площади орошаемых земель в бассейне оз. Ханка за весь период рисо-сеяния выполнена на основании официальных опубликованных источников и расчетным путем. За период 1995–2005 гг. необходимые данные были получены от ФБГУ «Управление Приммелиоводхоз». За предшествующий период – 1960–1995 гг. – ввиду полного отсутствия информации, орошаемые площади определялись расчетным путем, исходя из опубликованных статистических данных. Во всех статистических сборниках площади орошаемых земель приведены в целом по Приморскому краю; данные по районам края включают информацию по составу возделываемых сельскохозяйственных культур, при этом, площади посевов риса не выделены отдельной строкой, а приведены в совокупности с другими зерновыми культурами. Поэтому, площади орошаемых земель Приханкайской низменности определялись экспертным путем с использованием имеющихся данных о площадях орошаемых земель в Приморском крае. Интересно отметить, что данные об орошаемых площадях Приморского края имеются, начиная с 1918 г.

На основе обобщения и анализа имеющихся материалов [15] – [16],[17] стало возможным сопоставить за отдельные годы площади орошаемых земель в бассейне оз. Ханка и Приморского края, оценить вклад Приханкайской низменности в развитие орошения всего Приморского края и восстановить ряд данных об орошаемых площадях за многолетний период, начиная с 1960 г.

Для приближенной оценки годовых значений орошаемых площадей за много-летний период были установлены соотношения площадей орошаемых земель в бассейне оз. Ханка и Приморского края за отдельные годы, данные по которым имелись в наличии; эти сведения представлены в *таблице 5.9*.

С 1965 г. развитие орошения происходило в основном за счет роста посевов риса именно в бассейне оз. Ханка. Уже к 1965 г. здесь размещалось свыше 60 % всех посевов риса Приморья. В дальнейшем, расширение масштабов рисосеяния осуществлялось также преимущественно в Приханкайской низменности, где в последние годы оказалось

сосредоточенным более 90 % всех посевов риса в крае, что позволило получить за период 2011–2012 гг. около 85 % всего валового сбора риса в Приморье [18].

Таблица 5.9

Развитие орошения и вклад Приханкайской низменности в орошаемое земледелие Приморского края

Территория / годы	1965	1970	1985	1995	2000	2015
Приморский край, тыс. га	11,9	23,8	62,4	58,9	6,53	20,8
Приханкайская низменность, тыс. га	7,69	16,2	52,3	50,0	6,06	19,6
Вклад, %	64	68	84	85	93	94

Интересно отметить, что в проектных разработках 1960-х годов [19] доля бассейна оз. Ханка оценивалась менее 50 % от проектируемого уровня развития орошения в крае. При этом, под рис отводилось порядка 75 % ирригационно-подготовленных земель. На самом же деле в ходе реализации планов развития орошения в Приморье наиболее приоритетной оказалась именно территория Приханкайской низменности.

Распределение площадей орошаемых земель по административным районам бассейна оз. Ханка представлено в *таблице 5.10*.

Таблица 5.10

Доля орошаемых земель по рисосеющим административным районам бассейна оз. Ханка, %

Район	1965	1970	1980	1995	2000	2015
Спасский	46	40	17	17	25	15
Ханкайский	54	57	39	36	41	34
Хорольский	-	3	33	38	29	41
Черниговский	-	-	11	9	5	10

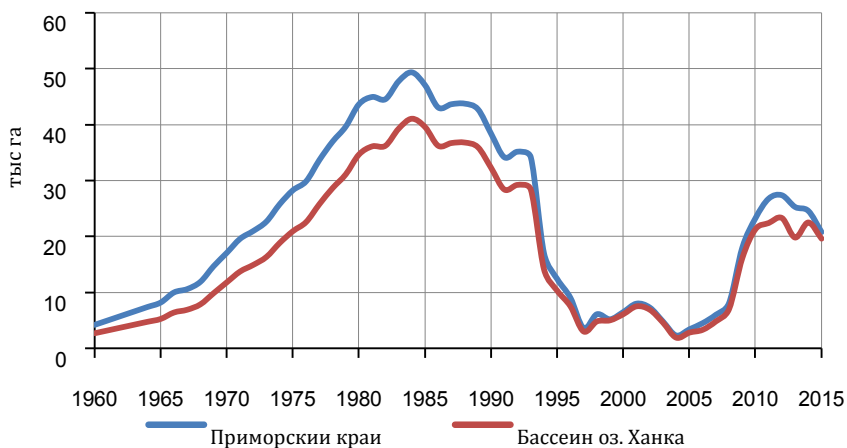
На протяжении длительного времени наибольшее развитие рисосеяние имело место в Ханкайском районе. В период максимального расширения площадей, занятых под рисовые посевы, к Ханкайскому району по этому показателю стал приближаться и Хорольский район. На уровне 2015 г. максимальная доля посевов риса приходится уже на Хорольский район. Менее всего развито рисосеяние в Черниговском районе. В периоды 2002–2005 гг. и 2011–2013 гг. посевы риса в этом районе вовсе не производились.



Полученные в *таблице 5.3* соотношения были использованы для восстановления годовых величин орошаемых земель в бассейне озера Ханка за период отсутствия учета орошаемых земель Приханкайской низменности – 1960–1995 гг. и анализа их динамики за весь многолетний период развития здесь орошаемого земледелия.

Многолетняя динамика площадей посевов риса в Приморском крае и в бассейне оз. Ханка представлена на *рисунке 5.26*.

Из графика видно, что заметный рост посевов стал прослеживаться лишь с начала 1970-х годов, когда стали реализовываться широкомасштабные планы развития оросительных мелиораций на Дальнем Востоке. В отличие от начального этапа развития рисосеяния рост площадей орошаемых земель в этот период стал осуществляться за счет использования водных ресурсов оз. Ханка. Озеро стало служить и приемником сбросных вод с рисовых чеков. Середина 1980-х годов характеризуется наибольшим развитием рисосеяния в российской части Приханкайской низменности. В тот период ежегодно поливалось около 40 тыс. га, что составляло примерно 80 % ирригационно-подготовленного фонда в размере 50 тыс. га. При этом, следует отметить, что приведенная в [20] средняя величина орошаемых земель в бассейне оз. Ханка за 1970–1980 гг. равная 53 тыс. га, представляется явно завышенной; в 1980 г. во всем Приморье орошалось всего 44,1 тыс. га. [21].



*Рисунок 5.26* – Динамика орошаемых площадей в Приморском крае и в бассейне оз. Ханка за период 1960–2015 гг.

В годы перестройки, когда государство отказалось от активной инвестиционной политики, сельскому хозяйству Приморского края был нанесен огромный ущерб. Площади посевов риса на российской части Приханкайской низменности стали стремительно сокращаться, достигнув в 2004 г. около 2 тыс. га. Таким образом, орошение здесь оказалось отброшенным назад как минимум на 40–50 лет.

Начало возрождения рисосеяния в бассейне оз. Ханка относится к 2005–2007 гг. Решающий вклад в этот процесс внесли зарубежные инвесторы, главным образом из республики Корея, особенно фирмы «Хёндо Король Агро» и «Агро Сангэнг» [22]. При этом прямые инвестиции достигали десятки миллионов долларов. Проведением ремонтно-восстановительных работ на бездействующих оросительных системах и непосредственным выращиванием риса занимались наемные работники из Китая. В 2005 г. в Приморье трудилось 20,8 тыс. иностранных работников, в том числе, более 60 % из КНР [23]. В Ханкайском районе в 2009 г. из общего числа рабочих, занятых в сельском хозяйстве, доля иностранных работников составляла 36 % [24].

### 5.2.2.2 Динамика развития орошения по данным спутниковой информации

По данным ретроспективных космических снимков, полученных в Дальневосточном центре Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ДЦ ФГБУ «НИЦ «Планета») стало возможным получить визуальную картину динамики площадей орошаемых земель для российской территории бассейна озера.



Рисунок 5.27 – Сравнительная динамика площадей чеков, залитых водой, км<sup>2</sup>

Необходимо отметить, что возделывание риса происходит по разным технологиям, в том числе и методом «сухого» выращивания. Для корректной оценки фактического вклада полей с заливной технологией выращивания риса с использованием водных ресурсов озера Ханка были получены данные отдельно по площадям как чеков, залитых водой, так и чеков, где рис выращивается по «сухой технологии».

На рисунке 5.27 приведены значения рассчитанных площадей для чеков, залитых водой, и общая площадь чеков с учетом выращивания по «сухой технологии» по годам, начиная с 1985 г.

Из рисунка видно, что с распадом СССР, начиная с 1991 г., наблюдается устойчивый спад в выращивании риса, который наглядно отражается в цифрах: площадь полей, на которых по данным спутникового дешифрирования выращивался рис (включая площади с сухой технологией возделывания), снизилась с 489,45 км<sup>2</sup> в 1989 г. до 55,77 км<sup>2</sup> в 2003 г. И только начиная с 2008 г. наблюдается тенденция к возобновлению возделывания этой культуры – площади рисовых полей снова увеличились.

На *рисунках 5.28 и 5.29* приведены снимки орошаемых площадей риса за различные годы развития рисосеяния на российской части бассейна, которые подтверждают общую тенденцию развития орошения на рассматриваемой территории.

По приведенным спутниковым снимкам орошаемая площадь в бассейне озера в 1985 г. оценивалась в 423 км<sup>2</sup>, в 2001г. она составляла 25,3 км<sup>2</sup>, а в 2015 г. площадь орошения увеличилась до 225 км<sup>2</sup>. Таким образом, полученные в результате расчетов орошаемые площади сопоставимы с приведенными выше статистическими данными.

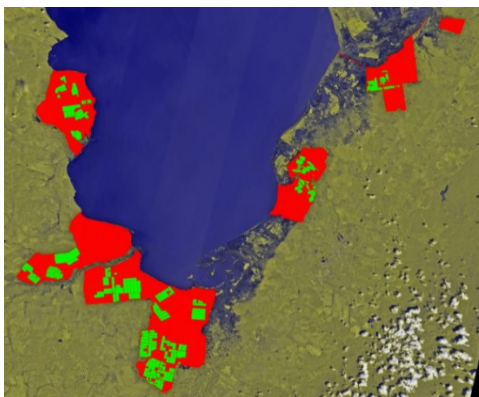
а)



б)



*Рисунок 5.28* – Изменения орошаемых площадей риса на российской территории бассейна оз. Ханка (с ИСЗ Landsat) за период 1985–2001 гг. (а – 1985 г., б – 2001 г.)



■ - полигон РОС  
■ - полигон чеков, залитых водой

*Рисунок 5.29* – Орошаемые площади риса на российской территории бассейна оз. Ханка (с ИСЗ Landsat) за 2015 г.

### 5.2.2.3 Полное и безвозвратное водопотребление в бассейне озера Ханка

Для оценки современного состояния использования воды и многолетней динамики водопотребления в бассейне оз. Ханка были обобщены и проанализированы имеющиеся данные непосредственного учета заборов и сбросов воды в бассейне озера, предоставленные Амурским БВУ и Приморским филиалом ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». Эти данные охватывают период 1985–2015 гг.

За последние 15 лет среднегодовой объем забираемой на все хозяйственные нужды воды (полное водопотребление) в бассейне оз. Ханка составляет 156.2 млн м<sup>3</sup>, объем сброса 53.4 млн м<sup>3</sup>, а безвозвратное водопотребление – 102.8 млн м<sup>3</sup>. Установлено, что из всего объема водозабора расход воды на орошение – затопление рисовых полей, составляет практически весь объем использованной в бассейне воды – более 90 %. При этом объемы воды на производственные и коммунальные нужды (хозяйственно-питьевые) приблизительно одинаковы. Водозабор непосредственно из озера на нужды орошения составляет около 95 %, остальное количество воды забирается из рек бассейна озера. Безвозвратные потери воды (безвозвратное водопотребление) в бассейне оз. Ханка достигают максимальных в Приморском крае значений и составляют в отдельные годы до 70 % от общего водозабора.

Ввиду отсутствия информации по водозаборам и сбросам в бассейне озера до 1985 г. для приближенной оценки объемов полного и безвозвратного водопотребления за весь период развития рисосеяния в бассейне озера – с 60-х годов прошлого столетия – были проанализированы все статистические данные по водопотреблению в Приморском крае, начиная с 1990 г., сопоставленные с имеющимися данными по использованию воды в этот же период в бассейне оз. Ханка, а также с данными по динамике развития орошаемых земель, как по Приморскому краю, так и в Приханкайской низменности.

Выбранный временной (1960–2015 гг.) позволяет оценить многолетнюю динамику водопотребления и орошаемых площадей и оценить влияние ирригации на водный режим озера Ханка на различных этапах хозяйственного использования земельных и водных ресурсов исследуемого бассейна.

Наличие фактических и определенных расчетным путем данных по орошаемым площадям за весь многолетний период, а также значений безвозвратного водопотребления, рассчитанного по разности забора и сброса воды в те годы, когда имелась по ним официальная учетная информация, позволило восстановить объемы полного и безвозвратного водопотребления за весь период хозяйственной деятельности в бассейне озера. Анализ всех имеющихся данных показал, что с одного гектара орошаемых земель безвозвратные потери могут составлять от 7 до 9 тыс. м<sup>3</sup> в год.

Фактические и определенные экспертным путем величины полного и безвозвратного водопотребления в бассейне оз. Ханка за весь период орошаемого земледелия приведены на *рисунке 5.30*.



*Рисунок 5.30* – Водопотребление в бассейне оз. Ханка за период 1960–2015 гг.

В период 1920–1950 гг. объемами воды на орошение можно пренебречь, так как рисовые системы в эти годы представляли собой небольшие участки, расположенные на пойменных участках рек. Около 90 % посевов риса тогда орошалось самотечным путем, а остальные – путем механического подъема воды [17].

Максимальные объемы воды, необходимые для орошения, изымались из озера в 80-х годах прошлого века. К 1985 г. величина полного водопотребления достигала более 600 млн м<sup>3</sup> в год.

Наименьшие величины водопотребления были отмечены в период 2002–2007 гг. В это же время на Приханкайской низменности практически было прекращено рисосеяние, на нужды которого использовался основной объем забираемой из оз. Ханка воды.

Восстановление рисосеяния начало происходить 2008 г., что сразу же сказалось на увеличении суммарного водозабора. К 2012 г. водопотребление увеличилось до 292 млн м<sup>3</sup>, далее, в 2013–2015 гг., последовал незначительный спад водопотребления, что было также обусловлено уменьшением посевов риса в этот период.

За весь рассматриваемый период хозяйственной деятельности безвозвратное водопотребление также изменялось в широких пределах от 40 до 390 млн м<sup>3</sup> в год. Наивысшие значения безвозвратных потерь приходятся на годы максимального развития орошаемого земледелия в бассейне оз. Ханка.

Следует отметить, что фактические значения безвозвратного водопотребления за период 2004–2007 гг, приведенные в *таблице 5.5*, вызывают сомнения, поскольку такого резкого его падения (до 10 млн м<sup>3</sup> в год) при орошаемых площадях 3–6 тыс. га не должно

происходить. По-видимому, это связано с недоучетом используемой на нужды орошения воды, вызванным реформированием земельных отношений в этот период. Поскольку в результате приватизации земельные доли на рисовых системах были скуплены физическими и юридическими лицами, была нарушена определенная упорядоченность взаимоотношений федеральных собственников межхозяйственных объектов и собственников внутрихозяйственной мелиоративной сети, что могло привести к искажению учетных данных по заборам и сбросам вод.

Сопоставление значений орошаемых земель и безвозвратного водопотребления за период 1960–2015 гг., необходимых для последующей оценки водных балансов озера и влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы оз. Ханка представлено в *таблице 5.11*.

*Таблица 5.11*

Площади орошения и безвозвратные потери в бассейне озера Ханка

Год	Орошаемые (политые земли), га	Безвозвратные потери млн м <sup>3</sup> в год	Год	Орошаемые (политые земли), га	Безвозвратные потери млн м <sup>3</sup> в год
1960	2700	19,6	1988	40300	274,8
1961	3200	23,1	1989	36300	239,2
1962	3700	26,6	1990	32300	251,3
1963	4200	40,0	1991	28700	210,1
1964	4700	44,1	1992	29600	237,0
1965	5200	43,2	1993	28700	267,5
1966	6400	57,6	1994	14300	201,5
1967	6900	62,1	1995	10400	124,4
1968	7900	63,2	1996	7500	85,1
1969	9800	88,2	1997	3000	74,4
1970	11800	94,4	1998	4800	38,7
1971	13700	108,8	1999	5000	76,2
1972	14900	134,1	2000	6100	94,0
1973	16300	146,7	2001	7500	111,2
1974	18800	169,2	2002	6900	36,52
1975	20900	188,1	2003	4600	51,62
1976	22600	203,4	2004	1900	11,78
1977	25800	206,4	2005	2800	16,8
1978	28600	228,8	2006	3300	22,38
1979	31100	248,8	2007	4800	22,4
1980	34700	277,6	2008	7000	70,31
1981	35100	280,8	2009	16100	172,8
1982	36200	289,6	2010	21300	200,2
1983	39300	314,4	2011	22400	198,1
1984	41100	328,8	2012	23300	205,8
1985	52200	384,6	2013	19800	155,2
1986	48200	284,7	2014	22500	152,5
1987	44200	324,0	2015	19600	127,3

### 5.2.3 Гидротехнические сооружения и мелиоративные системы, обеспечивающие хозяйственную деятельность в бассейне озера Ханка

Существенная особенность орошаемого земледелия на территории Приханкайской низменности заключается в том, что главным источником для орошения являются воды оз. Ханка. Это, в свою очередь, потребовало возведение соответствующих насосных станций для осуществления забора озерных вод и подачи их на орошаемые земли, искусственной откачки коллекторных вод и сброса их в озеро, строительство магистральных каналов, межхозяйственной и внутрихозяйственной оросительной сети.

Анализ состояния и структуры водохозяйственного комплекса в бассейне оз. Ханка был основан на использовании информации Департамента мелиорации Минсельхоза РФ, проектных разработок и материалов, представленных Амурским бассейновым управлением Росводресурсов [25], [26].

Водохозяйственный комплекс бассейна оз. Ханка, созданный с целью обеспечения условий для выращивания риса и защиты населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий от наводнений включает в себя:

- водохранилища для нужд орошения;
- защитные дамбы обвалования;
- рисовые оросительные системы (РОС) и осушительные системы (ОС) с входящими в них насосными станциями, оросительными каналами различного назначения.

Ниже в *таблице 5.12* помещены сведения о количестве и полном объеме искусственных водоемов в бассейне оз. Ханка, которые используются только на орошение. Построены они, в основном, на небольших реках, ключах и родниках.

*Таблица 5.12*

Характеристика искусственных водоемов в бассейне оз. Ханка

Район	Количество	Полная емкость, млн м <sup>3</sup>	Период строительства
Спасский	15	31,22	1973–1989
Ханкайский	3	1,28	1973–1982
Хорольский	6	1,57	1963–1985
Черниговский	6	2,17	1973–1989

Дамбы обвалования предназначены для защиты оросительных и осушительных систем, населенных пунктов от нагонов с оз. Ханка и паводковых разливов рек. Все они построены в период с 1972 по 1993 гг.

Основные характеристики дамб обвалования представлены в *таблице 5.13*.

Как следует из *таблицы 5.13*, строительство дамб обвалования осуществлялось в течение более 20 лет. Их суммарная протяженность составила 150 км, а высоты варьировали от 2,4 до 3,7 м. Подавляющая часть дамб предназначалась для защиты от паводковых разливов рек (84 %) и лишь совсем немногие – от нагонов

со стороны озера. Для возделывания риса, начиная с 1970-х годов, в бассейне озера стали строиться специальные гидромелиоративные сооружения – рисовые орошительные системы (РОС). Уже к середине 1980-х годов эти системы опоясали озеро на протяжении 160 км при длине береговой линии на территории России 308 км. Тогда на российской части Приханкайской низменности располагалось 10 РОС, не считая одной овощеводческой системы и Приморского филиала ВНИИ риса [27] [28].

Таблица 5.13

Дамбы обвалования в бассейне оз. Ханка

Источник наводнения	Год	Протяженность, км	Высота, м
<i>Хорольский район</i>			
<i>Сиваковская РОС</i>			
Озеро	1978	3,6	2,38
Река	1976	18,8	2,58
<i>Луговая РОС</i>			
Река	1984	14,3	3,71
<i>Новодевичанская РОС</i>			
Озеро	1978	13,4	-
<i>Луговая РОС, Вадимовская РОС</i>			
2 реки	1986	14,0	-
<i>Луговая РОС</i>			
Река	1978	6,0	-
<i>Петровичанская РОС</i>			
Река	1986	8,1	2,38
<i>Хорольская ОС</i>			
Река	1984	4,5	-
<i>Вадимовская РОС</i>			
Река	1993	11,91	2,38
<i>с. Лучки</i>			
Река	1985	8,75	2,96
<i>Ханкайский район</i>			
<i>Троицкая ОС</i>			
Озеро	-	-	-
<i>Синтухинская ОС</i>			
Озеро	1972	7,7	-
<i>Мельгуновская РОС, Мельгуновская ОС</i>			
Река	1977	25,4	-
<i>Владими́ро-Петровская РОС</i>			
Река	1980	22,7	-
<i>СХКП «Авангард»</i>			
Озеро	-	-	-



В современных условиях в Спасском и Черниговском районах находится по одной РОС, соответственно Сантахезская и Вадимовская; в Ханкайском районе – Синтухинская, Владимиро-Петровская, Мельгуновская и Астраханский овощной участок; в Хорольском – Луговая, Петровичанская, Сиваковская и Новодевичанская. По сравнению с прошлым из числа ранее действующих РОС не работает одна – в Спасском районе. Согласно паспортным данным указанных оросительных систем, в их пределах предусматривалось оросить 50,7 тыс. га земли, в том числе 50,5 тыс. га с рисовым севооборотом и 215 га – овощных культур [17]. Фактически, в среднем за 2013–2015 гг. было полито 20.6 тыс. га, или 41 %, т.е. около 60 % рисовой пашни оказалась невозделанной.

По данным [25] в исследуемом бассейне действуют три осушительные системы: Снегуровская, Хорольская и Новодевичанская. Первые две находятся в Хорольском районе, последняя – в Ханкайском. Для Снегуровской и Хорольской ОС водоприемником служит р. Мельгуновка, для Новодевичанской ОС – Новодевичанский нагорный канал. Суммарная проектная площадь осушения была установлена в размере 5,85 тыс. га. В 2014 г. удалось осушить 4,34 тыс. га, или 74% от проектного уровня.

Одной из важнейших составляющих РОС являются насосные станции. По данным [27] с 1968 по 1984 гг. было построено всего 12 таких объектов. Сколько их действует в настоящее время – неизвестно, учитывая, что рис возделывается на существенно меньших площадях по сравнению с проектными. Согласно материалам Департамента мелиорации [25] паспорта имеются лишь по двум станциям: Астраханской (1975 г.) и Петровско-Александровской (1977г.). Для указанных станций водоисточником, и одновременно водоприемником служит оз. Ханка. Они же обеспечивают и основной водозабор для территории Приханкайской низменности.

Согласно сведениям, представленным в [27], к числу действующих насосных установок можно отнести и Сиваковскую станцию. Она расположена в Хорольском районе у с. Сиваковка (*рисунок 5.31*) и является самой мощной. Производительность ее насосов оставляет 54,12 м<sup>3</sup>/сек. Станция имеет двойное назначение – орошает 35 тыс. га и осушает 16 тыс. га [27].

Подъем воды для орошения осуществляется поэтапно. Сначала вода из озера подается в межхозяйственные магистральные каналы, а далее с помощью насосных станций второго и третьего подъема она поступает на орошаемые земли. Кроме того, ряд насосных станций второго и третьего порядка (Морозовская, Мельгуновская, Новосельская №1 и №2) забирают незначительные объемы воды из рек Илистая, Мельгуновка, Комиссаровка. По экспертным оценкам объем воды, забираемый из рек, составляет всего 5 % от суммарного водозабора в бассейне оз. Ханка.

Сбросы с рисовых чеков осуществляются в оз. Ханка самотеком или принудительно с помощью насосов в реки: Мельгуновка, Илистая, Комиссаровка, Рисовка, Спасовка или по сбросным каналам (коллекторам) вдоль дамб обвалования. Среднегодовой объем сбросных вод в оз. Ханка составляет порядка 30–40 % от водозабора [29], [30].

На основании всей имеющейся информации, в том числе, представленной Амурским БВУ, составлена схема оросительных и осушительных систем, а также гидротехнических сооружений, входящих в их состав (рисунки 5.32).



Рисунок 5.31 – Сиваковская насосная станция

В систему гидротехнических сооружений на российской территории входят также два канала, расположенных южнее истока реки Сунгача. Первый – Сунгачинский канал протяженностью 8,2 км, шириной 25–30 м, глубиной до 2 м – находится в 1 км от истока р. Сунгача и сливается с Александровским сбросным каналом. Анализ космических снимков показал, что канал действует с 1972 г. Второй канал (без названия) протяженностью 11 км, шириной 15 м – находится в 8,7 км ниже истока р. Сунгача, также сливается с Александровским сбросным каналом. Далее вода по Александровскому сбросному каналу поступает в р. Сунгача. Схема расположения водоотводящих каналов приведена на рисунке 5.33.

Следует отметить, что, начиная с периода реформирования экономических, земельных отношений, в процессе приватизации государственного имущества в России и до настоящего времени в Приморском крае сложились весьма своеобразные условия для дальнейшего развития здесь рисосеяния. В настоящее время насосные станции и межхозяйственные магистральные каналы находятся в собственности РФ. Внутрихозяйственные каналы и дамбы эксплуатируются муниципальными образованиями и частными хозяйствами. На большинство из них собственность юридически

не оформлена, либо оформлена с нарушением федерального законодательства. По данным Департамента мелиорации Министерства сельского хозяйства РФ капитальному ремонту подлежит около 45 % оросительных систем, а реконструкции – 29 %, т.е. всего 26 % оросительных систем находятся в удовлетворительном состоянии. Кроме того, по отдельным системам и сооружениям фактический износ по балансу составляет более 90 %.



Рисунок 5.32 – Карта-схема основных ГТС в российской части бассейна озера



Рисунок 5.33 – Схема расположения водоотводящих каналов из оз. Ханка

### 5.3 Хозяйственная деятельность на китайской части бассейна озера Ханка и сопредельных территориях

#### 5.3.1 Описание водохозяйственной системы КНР

По данным Доклада UNEP [Diagnostic Analysis, 2001], на территории китайской части бассейна оз. Ханка проживает около 130 тыс. человек. Плотность населения составляет 55 человек/кв. км. Главный административный центр – город Мишань, который находится за пределами бассейна, на р. Мулинхэ. Население этой части бассейна занято сельскохозяйственным производством и рыболовством, в незначительной степени здесь развиты добыча угля и деревообработка.

Опубликованные и предоставленные китайской стороной данные по водохозяйственной инфраструктуре и водопотреблению на китайской территории бассейна весьма неполны и противоречивы. Оценка водохозяйственной ситуации на китайской территории бассейна озера выполнена с помощью спутниковых данных и материалов натурных обследований российских специалистов в рамках проведения на территории КНР VII-го заседания Рабочей группы по управлению водными ресурсами Совместной Российско-Китайской комиссии по рациональному использованию и охране трансграничных вод (июнь 2016 г.).

К концу 1990-х гг. на китайской части бассейна оз. Ханка была создана крупномасштабная комплексная водохозяйственная система, включающая гидротехнические сооружения (ГТС), оросительные и мелиоративные каналы, каналы переброски стока, крупные оросительные системы, в основном – рисовые (РОС). Основное назначение этой системы – отведение паводковых вод р. Мулинхэ для защиты густонаселенных районов в нижнем течении реки с дальнейшим использованием этих вод для орошения РОС. На *рисунках 5.34–5.36* показаны основные звенья этой системы – на космическом снимке и на линейной схеме соответственно.

Китайская часть водосбора оз. Ханка, включая оз. Малая Ханка, относительно невелика, и хозяйственная деятельность на ней не может оказать заметного влияния на водный режим и водный баланс оз. Ханка. Основное влияние здесь принадлежит переброске стока из р. Мулинхэ, который затем может, как попадать в оз. Ханка, так и, минуя его, подаваться на РОС и сбрасываться в р. Сунгач.

Основные узлы вододеления – это шлюз Хубэй на р. Мулинхэ, канал Донгди (Мусин), ГТС для регулирования пропуска воды из канала Донгди в наливное вдхр. Циншань (2А на *рисунке 5.34*), водохранилище Циншань и два сбросных гидроузла на нем (№№ 3 и 4) и три ГТС на перешейке озер Ханка и Малая Ханка (№6).

Шлюз «Хубэй» на р.Мулинхэ (№1 на *рисунке 5.36*), расположен в 5,5 км ниже ответвления канала Донгди и используется для защиты от паводков территорией нижнего течения р. Мулинхэ. Строительство началось в 1942 г., в 1965 г. сооружение

было разрушено из-за сильного наводнения, восстановлено в 1969–1970 гг. Шлюз представляет собой мост с одним пролетом, перекрываемым стальным подъемным затвором шириной 12 м и высотой 6 м, максимальная пропускная способность 250 м<sup>3</sup>/с. Ширина реки в районе шлюза 10–12 м.



1 – вододельитель на р. Мулинхэ; 2 – канал Донгди; 2А – ГТС для регулирования пропуска воды по каналу Донгди в наливное вдр.Циншань; 3 – водохранилище Циншань; 4 – два сбросных канала, отводящих воду из водохранилища на РОС и в р. Сунгач; 5 – оз. МалаяХанка; 6 – три ГТС на перешейке между оз. Малая Ханка и Ханка

Рисунок 5.34 – Водохозяйственная система КНР на оз. Ханка, оз. Малая Ханка и р. Мулинхэ (основа – снимок ИСЗ Landsat 8, май 2016)

Остальная часть стока р.Мулинхэ свободно направляется в канал Донгди (Мусин). Канал представляет собой земляное русло, без берегоукрепительных сооружений (№2, рисунок 5.37). Ширина канала в районе автодорожного моста, расположенного в 3 км ниже начала канала, около 60 м. Выше моста имеется гидроствор, оборудованный расходомерным устройством, аналогичным ГР-70. Ниже моста расположена будка урвнемера.

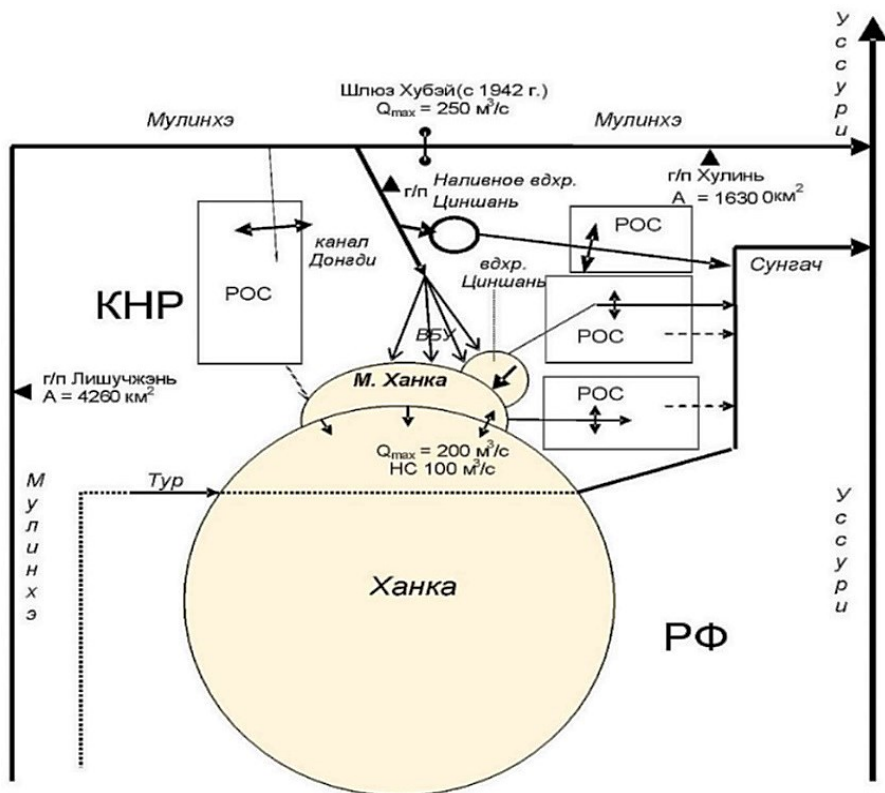


Рисунок 5.35 – Линейная схема водохозяйственной системы КНР на оз. Ханка, оз. Малая Ханка и р. Мулинхэ



Рисунок 5.36 – Шлюз Хубэй и р. Мулинхэ выше шлюза



а – вид вверх по течению; б – снимок с ИСЗ; в, г – гидрометрические сооружения

Рисунок 5.37 – Канал Мусин (Донгди)

На спутниковом снимке высокого разрешения (Спутник Here.com от 24.10.2012 г.) в 10 км ниже по течению начала канала Донгди, в его русле обнаружено ГТС в виде шлюзовых ворот (рисунок 5.38). Ширина канала в этом месте составляет около 78 метров. Имеется предположение, что основное предназначение этого сооружения состоит в перенаправлении части стока из канала Донгди в наливное водохранилище Циншань, расположенное в 8 км к юго-востоку от сооружения и, далее на орошение территорий к В-ЮВ от него. Следует отметить, что на запрос российских специалистов руководителем китайской делегации на заседании Рабочей группы было заявлено, что сток по каналу не измеряется, и данных по его стоку китайская сторона предоставить не может.

Канал Донгди (Мусин) в нижней части разветвляется на несколько рукавов, часть которых образует обширные водно-болотные угодья (ВБУ) и заканчивается в оз. Малая Ханка. Основной рукав канала Донгди (Мусин) заканчивается водохранилищем Циншань, связанным с оз. Малая Ханка несколькими прорезями через перешеек (рисунок 5.39).

Из водохранилища часть воды используется на расположенной за дамбой водохранилища РОС, а остальная вода отводится двумя каналами в р.Сунгач, по пути также распределяясь на РОС. На северном берегу водохранилища Циншань находятся 2 водопропускных ГТС (рисунок 5.40), осуществляющих сброс воды из водохранилища в небольшую реку и большой искусственный канал. Эти водотоки протекают через РОС, осуществляют подачу воды на поля и достигают р. Сунгач (см. рисунки 5.34, 5.35). Сбросы воды с этих РОС также осуществляются в р. Сунгач.

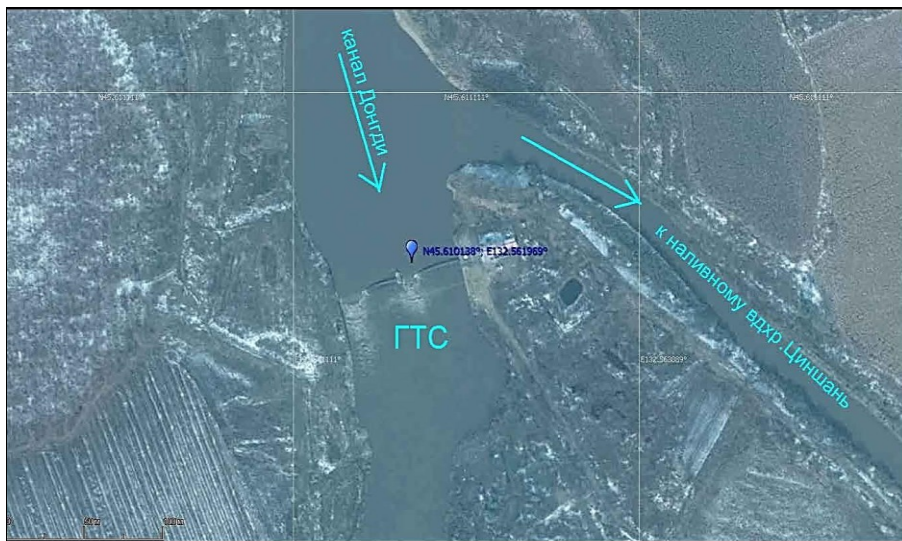


Рисунок 5.38 – ГТС для регулирования пропуска воды по каналу Донгди в наливное вдхр. Циншань



Рисунок 5.39 – Водохранилище Циншань (Google Earth, октябрь 2013)

Оз. Малая Ханка отделено от оз. Ханка перешейком, на котором расположены туристические базы, причалы, рыболовецкие хозяйства, автомобильная дорога, а также три ГТС, регулирующие водообмен между озерами (рисунок 5.41). Эти ГТС, регулирующие водообмен между озерами Ханка и Малая Ханка, были построены в разное время и имеют различные характеристики.





Рисунок 5.40 – Сбросные ГТС из водохранилища Циншань (World View 2, апрель 2013)



Рисунок 5.41 – Китайские ГТС на перешейке между озерами Ханка и Малая Ханка (Google Earth, октябрь 2013)

ГТС-1 (рисунок 5.42) в западной части перешейка существует давно. На имеющемся самом раннем космическом снимке Landsat за 1972 г. это ГТС уже существует. Ширина водослива ГТС около 10 м. Исходя из размеров этого ГТС, можно сделать вывод, что оно могло использоваться для сброса воды в оз. Ханка до начала перебросок стока из р. Мулинхэ по каналу Донгди. В настоящее время ГТС не используется, его пропускная способность несравнима с характеристиками канала и не может обеспечивать достаточный сброс вод, поступающих в озеро по каналу.

ГТС-2 (рисунок 5.43) было построено в 1975-1977 гг. Можно предположить, что его создание было связано с экстремально высокой водностью 1974 г., в результате которой могло произойти переполнение оз. Малая Ханка и/или прорыв через перешеек в оз. Ханка.



Рисунок 5.42 – ГТС-1 на перешейке между озерами Ханка и Малая Ханка



Рисунок 5.43 – ГТС-2 на перешейке между озерами Ханка и Малая Ханка



а – вид из космоса, б – павильон затворов, в – насосная станция

Рисунок 5.44 – ГТС-3 на перешейке между озерами Ханка и Малая Ханка

К сожалению, свидетельств этого не найдено, космических снимков за 1974 г. также не обнаружено. ГТС-2 состоит из 10 пролетов с затворами шириной по 8 м. Максимальная пропускная способность составляет  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Строительство ГТС-3 (рисунок 5.44) происходило в 1999–2002 гг. Сбросная часть состоит из 8 сегментных затворов, обеспечивающих максимальный расход до  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ . Кроме того, по обеим сторонам нижнего бьефа ГТС построены две насосные станции, состоящие из 10 насосов производительностью по  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  каждый, для обратной закачки воды из оз. Ханка в Малую Ханку при недостатке воды в последней.

По информации китайской стороны и на основании натурального обследования водохозяйственной системы в бассейне оз. Ханка, оз. Малая Ханка выполняет функцию водоема-регулятора для водоснабжения РОС. Сезонный ход уровня воды в озере составляет 0,5–1,0 м. Оптимальный уровень воды, гарантирующий бесперебойное водоснабжение РОС, составляет 71,1 м (70,35 м БС77) и достигается путем регулирования сбросными ГТС и насосными станциями; критическое значение

уровня, при котором начинается сброс, 71,2 м (70,45 м БС77). На момент обследования (4.06.2016) по информации китайских специалистов уровень оз. Малая Ханка составлял 71,36 м (70,61 м БС77), а в оз. Ханка – 70,90 м (70,15 м БС77)<sup>1</sup>.

Следует отметить, что водосбросные сооружения общей пропускной способностью до 200 м<sup>3</sup>/с рассчитаны на сброс именно паводковых вод реки Мулинхэ, поскольку собственный водосбор оз. Малая Ханка очень мал, и сток с него не может достигнуть таких значений. Эти сбросы могут оказывать значимое влияние на водный баланс и уровень оз. Ханка. То, что эти сбросы имеют место, хорошо видно на космических снимках за разные годы.

К сожалению, никакой объективной количественной информации, как по величинам этих сбросов, так и по другим характеристикам функционирования водохозяйственной системы, у китайской стороны получить не удалось.

<sup>1</sup> Первая отметка – в системе высот Желтого моря; перевод в БС77 (в скобках) выполнен исходя из муровня оз. Ханка 70,15 м БС77 на дату обследования.

## 6. Составляющие водного баланса озера Ханка и их определения

### 6.1 Приток речных вод

Поверхностный приток воды в озеро является основной приходной составляющей его водного баланса. Изучение поверхностного притока в оз. Ханка начато в конце XIX столетия в связи с хозяйственным освоением территории бассейна оз. Ханка и использованием водного пути, проходившего через р. Уссури, ее левый приток р. Сунгач и оз. Ханка.

На российской территории в оз. Ханка впадают 20 рек с площадью водосбора более 100 км<sup>2</sup>, самые крупные реки – Тур, Большие Усачи, Комиссаровка, Мельгуновка, Илистая, Спасовка. Всего в бассейне оз. Ханка насчитывается 117 водотоков, площадью водосбора от 28,3 км<sup>2</sup> до 5470 км<sup>2</sup>. Общая площадь водосбора оз. Ханка (без зеркала озера) составляет 16890 км<sup>2</sup>, в том числе на территории РФ – 15370 км<sup>2</sup>.

Одним из первых описание рек, впадающих в озеро, дал Н. М. Пржевальский в своей книге «Путешествие в Уссурийском крае 1867–1869 гг.» [1]. Н. М. Пржевальский выполнил промеры глубин рек и описал характер долин рек Комиссаровка, Илистая и Мельгуновка.

В 1890 г. Р. О. Юргенсон измерил расходы воды на основных притоках озера – реках Мельгуновка, Илистая и Спасовка. Общий поверхностный приток в озеро составил, по его расчетам, 77,6 м<sup>3</sup>/с [31].

В 1912 г. была организована специальная гидротехническая партия под руководством инженера А. И. Булгакова, и в 1914 г. в бассейне оз. Ханка было открыто пять водомерных постов: р. Спасовка (Сантахеза) – с. Гайворон; р. Илистая (Лефу) – с. Халкидон; р. Мельгуновка (Мо) – Старая Девица; р. Комиссаровка (Синтухэ) – с. Ильинка; р. Сунгач – с. Новомихайловка. Значительный рост сети гидрологических станций наблюдался с 1927 г. после создания Дальневосточного гидрометеорологического бюро. В 1933 г. А. И. Булгаковым была предпринята попытка рассчитать водный баланс озера за 19 лет (1913–1932 гг.). Общий поверхностный приток в озеро за этот период по его расчетам составил 52,7 м<sup>3</sup>/с. Серпик Б. И. в книге «Водные ресурсы рек Южного Приморья Дальнего Востока» [4] дает основные характеристики водных ресурсов Южного Приморья. Для расчета поверхностного притока использовались материалы наблюдений на гидрологических постах: Комиссаровка, Мельгуновка, Илистая, Спасовка. Автор отмечает, что поверхностный приток может быть учтен очень ориентировочно, так как периоды наблюдений за стоком рек неоднородны и материалы по стоку неполноценны. В среднем для рек всего бассейна оз. Ханка модуль стока был определен по карте изолиний нормы стока. Общий поверхностный приток в озеро за период 1932–1952 гг. по расчетам автора составил 1,99 км<sup>3</sup> в год.

В монографии «Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза» 1967 года [32], приведено значение поверхностного притока – 1,99 км<sup>3</sup>. Для определения среднего за многолетний период годового стока использованы материалы, помещенные в монографии К. П. Воскресенского [33], – величины стока рек по отдельным пунктам наблюдений и карта нормы стока в масштабе 1:5 000 000, а также данные, опубликованные в гидрологических ежегодниках. Сток с неизученных участков водосбора рассчитан по карте нормы стока.

Наиболее полно и подробно поверхностный приток в оз. Ханка, исследован в монографии М. Г. Васьковского «Гидрологический режим озера Ханка» [1]. Приведен годичный поверхностный приток за период наблюдений 1949–1971 гг. В книге представлены результаты анализа и обобщения материалов гидрологических наблюдений по рекам, впадающим в оз. Ханка.

В частности, М. Г. Васьковский указывает, что в бассейне оз. Ханка на территории СССР эпизодические наблюдения за стоком воды в разные годы производились в 25 пунктах, а по состоянию на 01.01.1973 г. – в 14 пунктах. Систематические же наблюдения за стоком воды на основных реках бассейна начали производиться с 1954 г. В связи с этим, при расчетах водного баланса оз. Ханка за период с 1949 по 1971 гг., суммарный сток за 1949–1953 гг. приближенно восстановлен по графику связи с р. Иистой у с. Халкидон. Для расчета нормы стока (среднего значения за 23 года) были приняты зависимости между годовыми модулями стока по другим опорным пунктам. Для некоторых пунктов использовались графики связи между среднемесячными расходами воды. По пунктам р. Илистая – с. Халкидон, р. Черниговка – с. Черниговка, р. Мельгуновка – с. Стародевица, р. Нестеровка – рзд Таловый сток за отдельные годы был пересчитан и уточнен по сравнению с опубликованным в справочнике «Ресурсы поверхностных вод СССР» [34], пересчет производился в основном за паводочные периоды по уточненным в последние годы кривым расходов воды.

Для расчета годового притока воды в оз. Ханка автором были использованы данные наблюдений по нижним (замыкающим) створам основных рек бассейна. Сток р. Спасовки у с. Гайворон изучался лишь в 1947, 1948, 1950–1958 гг., поэтому за отдельные годы сток определялся по графику связи между годовыми модулями стока р. Спасовки и р. Иистой у с. Халкидон.

При расчете поверхностного притока М. Г. Васьковский принял изученную водосборную площадь бассейна оз. Ханка равной 11319 км<sup>2</sup> (бассейн р. Спасовки до с. Гайворон принят как условно изученный). Незученная часть (низовья рек и бассейны небольших притоков, впадающих в оз. Ханка) составляла 4051 км<sup>2</sup> или 26,4 % общей площади водосбора. Для расчета притока с этой площади были построены карты годового стока для трех лет разной водности и для среднего многолетнего годового стока. По этой карте был определен сток с неизученной части бассейна оз. Ханка. Он оказался равным 11,8 % годового стока рек изученной территории.

Автором приведена зависимость стока воды с неизученной территории от притока воды с изученной части бассейна оз. Ханка, по которой был определен сток воды с неизученной территории для всех лет и вычислен суммарный приток воды в оз. Ханка.

М. Г. Васьковский предложил уравнение для приближенного расчета годового притока в озеро:

$$Q_{np} = 1,92 \cdot Q_{ст}, \quad (6.1)$$

где  $Q_{np}$  – годовой приток в оз. Ханка,  $Q_{ст}$  – годовой суммарный сток воды р. Илостой у с. Халкидон и р. Мельгуновки у пос. Лугового.

Средняя многолетняя величина поверхностного притока составила 1,94.

При расчетах водного баланса М. Г. Васьковский не учитывал поверхностный приток воды с территории КНР в оз. Ханка.

В книге Викулиной З. А. «Водный баланс озер и водохранилищ Советского Союза» [35] приводятся результаты расчетов притока, выполненных М. Г. Васьковским в книге «Гидрологический режим озера Ханка» [1].

В справочнике-монографии «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» [36] приведены значения поверхностного притока за период с 1949 по 1980 гг., в том числе с 1949 по 1971 г. по данным М. Г. Васьковского. Приток воды за 1972–1980 гг. получен по данным гидрометрических измерений, а при их отсутствии с использованием метода аналогии. Средняя величина поверхностного притока за этот период составила 1,93 км<sup>3</sup> в год.

В монографии «Водные ресурсы СССР и их использование» [37] приведены аналогичные значения поверхностного притока за период с 1949 по 1980 гг.

Величина среднего многолетнего поверхностного притока для оз. Ханка приведена в монографии «Водные ресурсы России и их использование» 2008 г. [38], в которую включены многолетние характеристики элементов водного баланса этого озера за период 1949–1980 г. и за период 1981–2005 г.

Величина поверхностного притока за период 1949–1980 г. составляет 1,93 км<sup>3</sup> в год, а за период 1981–2005 г. – 2,13 м<sup>3</sup> в год.

В *таблице 6.1* приведена сводка значений суммарного притока речных вод в озеро по данным различных источников.

*Таблица 6.1*

Значения суммарного притока речных вод в оз. Ханка по данным различных источников

Автор/источник	Расчетный период	Поверхностный приток		Примечание
		км <sup>3</sup>	мм	
Р. О. Юргенсон [39]	1890	2,45	638	Оценка притока проводилась с использованием измерений на рр. Мельгуновка, Илостая и Спасовка.

Автор/источник	Расчетный период	Поверхностный приток		Примечание
		км <sup>3</sup>	мм	
А. И. Булгаков [1]	1913-1932	1,66	415	Подсчет притока проводился с использованием измерений на рр. Мельгуновка, Илистая и Спасовка.
Л. М. Устиновская [1]	1930-1952	1,67	417	
Б. И. Серпик [4]	1930-1952	1,99	497	Расчет притока проводился с использованием измерений на рр. Мельгуновка Илистая, Комиссаровка и Спасовка. Периоды наблюдений за стоком рек неоднородны и материалы по стоку неполноценны
Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза [32]	1949-1960	1,99	475	Расчет проводился по результатам наблюдения и по карте нормы стока
К расчету водного баланса оз. Ханка [1]	1925-1965	1,77	435	Расчет проводился по данным о норме годового стока рек, впадающих в озеро за многолетний период (41 год). Величины взяты из справочника «Ресурсы поверхностных вод» [34]. Сток с неизученных рек определен по карте годового стока.
М. Г. Васьковский [1]	1949-1971	1,94	476	Расчет притока проводился с использованием измерений на рр. Мельгуновка, Илистая, Спасовка, Комиссаровка
З. А. Викулина [35]	1949-1971	1,94	476	Приводится подсчет притока по М. Г. Васьковскому
Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод, том 1 выпуск 21 Бассейны Уссури и рек Японского моря [36]	1949-1980	1,93	461	За 1949–1971 гг. приведены значения поверхностного притока из [1]. За 1972–1980 гг. приток рассчитан по данным наблюдений с использованием метода аналогии
Водные ресурсы СССР и их использование [40]	1949-1980	1,93	461	Приведены значения поверхностного притока из [36] [1]
Водные ресурсы России и их использование [38]	1949-1980	1,93	461	Приведены значения поверхностного притока из [36]
	1981-2005	2,13	508	По данным гидрометрических наблюдений



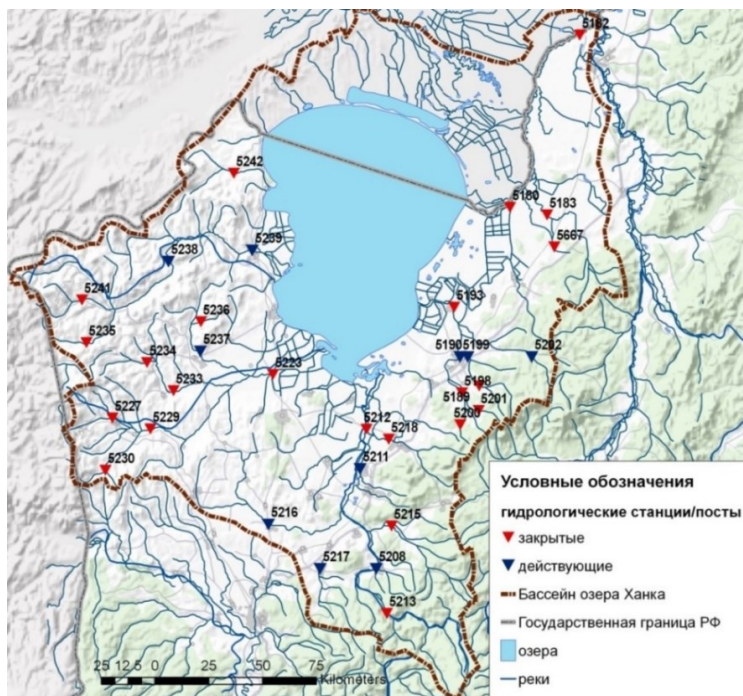


Рисунок 6.1 – Схема расположения гидрологических постов в бассейне оз. Ханка и р. Сунгач

Для расчета притока речных вод был применен методический подход, основанный как на максимальном использовании всей имеющейся гидрометрической информации, в том числе и по закрытым гидрологическим постам, так и на корректном применении методов приведения стоковых рядов к многолетнему периоду.

Приведение исходных данных наблюдений к многолетнему периоду основано на привлечении гидрометрических материалов в пунктах-аналогах в соответствии с [41].

Для надежной оценки значений стока за отдельные годы использовались аналитические методы восстановления данных наблюдений [42] [43], основанные на регрессионном анализе с привлечением одного или нескольких пунктов – аналогов на различных временных этапах. Поэтапное использование нескольких аналогов существенно расширяет возможности приведения и делает его более качественным по сравнению с методами, в которых используется дополнительная информация только в одном пункте – аналоге.

Расчеты по приведению месячных и годовых рядов стока к многолетнему периоду выполнялись с использованием сертифицированной автоматизированной системы инженерных гидрологических расчетов, представляющих собой комплекс основных вычислительных программ HydroStatCalc [44], разработанных в ФГБУ «ГГИ».

Таблица 6.2

## Основные гидрографические характеристики рек бассейна оз. Ханка

Код поста	Река-пункт	Куда впадает	Расстояние, км		Уклон реки, ‰		Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средняя высота водосбора, м	Средний уклон водосбора, ‰	Заболоченность, %	Лесистость, %	Распаханность, %
			от наиболее удаленной точки речной системы	от истока (начала) реки	средний	средневе-шечный						
5193	Спасовка (Сантахеца) – с. Гайворон	оз. Ханка	67	12	9,3	2,5	1200	181		14	46	<5
	Спасовка (Сантахеца) – устье	оз. Ханка	86	31	7,3	1,4	1260	177		15	44	<5
5189	Спасовка – с. Дубовское	Спасовка (Сантахеца)	27	27	16,1	10,7	249	258	142	8	68	
	Спасовка – устье	Спасовка (Сантахеца)	52	52	7,7	1,7	721	193	96,6	13	50	<5
5198	Кулеповка – с. Красный Кут	Спасовка	19	19	9,9	3,4	186	225	126	1	82	<5
	Кулеповка – устье	Спасовка	42	42	4,8	1,2	324	177	86,4	12	47	6
5208	Илистая (Лефу) – с. Ивановка	оз. Ханка	87	87	8,5	4,8	998	353	133		87	
5211	Илистая (Лефу) – с. Халкидон	оз. Ханка	154	154	4,9	2,0	4030	246		13	46	
5212	Илистая (Лефу) (основная протока) – с. Вадимовка	оз. Ханка	179	179	4,3	1,4	4580	234		13	42	
	Илистая (Лефу) – устье	оз. Ханка	220	220	3,7	1,1	5470	217		18	42	
5213	Ивановка – с. Ивановка	Илистая	18	18	17,8	11,3	89,5	200	106	10	63	
	Ивановка – устье	Илистая	18	18	16,7	10,9	90	215	120	10	63	
5215	Снегуровка (Сандуган) – с. Снегуровка	Илистая	47	47	7,9	5,4	450	309	140	5	79	
	Снегуровка (Сандуган) – устье	Илистая	61	61	6,4	4,0	773	253	112	8	71	
5216	Абрамовка (Чихеза) – с. Абрамовка	Илистая	59	54	4,0	1,4	839	146	34,0	13	3	

Код поста	Река-пункт	Куда впадает	Расстояние, км		Уклон реки, ‰		Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средняя высота водосбора, м	Средний уклон водосбора, ‰	Заболоченность, %	Лесистость, %	Распаханность, %
			от наиболее удаленной точки речной системы	от истока (начала) реки	средний	средневе- шенный						
	Абрамовка (Чихеза) – устье	Илистая	107	102	2,1	0,6	1610	148		20	13	
5217	Осиновка – с. Осиновка	Абрамовка	34	34	6,6	3,4	289	160	65,2	7	42	
	Осиновка – устье	Абрамовка	53	53	4,3	1,8	470	140	47,6	12	31	
5218	Черниговка – с. Черниговка (ж.-д. мост)	Илистая	30	30	9,3	6,2	322	300	124		87	
	Черниговка – устье	Илистая	42	42	6,9	3,9	387	227	107	1	87	<5
5223	Мельгуновка (Мо) – пос. Луговой (з. Чеха)	оз. Ханка	136	38	4,0	1,0	3450	238		18	16	
	Мельгуновка (Мо) – с. Старо-Девича	оз. Ханка	151	53	3,6	1,0	3480	238		19	15	6
	Мельгуновка (Мо) – устье	оз. Ханка	165	67	3,3	0,8	3510	235		19	14	
5229	Нестеровка (Тахейж) – рзд. Таловый	Мельгуновка	42	42	11,6	5,9	867	280	120	2	30	
	Нестеровка (Тахейж) – устье	Мельгуновка	98	98	5,4	1,6	1440	246		12	19	
5230	Золотая – с. Барано-Оренбургское	Нестеровка	38	26	11,9	8,8	212	317	116	8	36	
	Золотая – устье	Нестеровка	39	27	11,6	9,1	213	316	115	8	36	
5235	Студеная (Бейчихе) – с. Духовское	Мельгуновка	35	35	12,7	12,0	344	391	91,3	16	14	
	Студеная (Бейчихе) – устье	Мельгуновка	83	83	6,3	4,2	762	283	73,3	19	10	
5236	Молоканка – с. Рубиновка	Мельгуновка	27	17	6,6	6,2	233	283	120	14	24	
5237	Молоканка – с. Жариково	Мельгуновка	44	34	4,7	3,1	390	259	116	14	21	
	Молоканка – устье	Мельгуновка	73	63	3,3	1,9	562	221	92,3	20	19	
5238	Комиссаровка (Синтухэ) –	оз. Ханка	86*	35	9,0	4,5	1170	458		4	45	

Код поста	Река-пункт	Куда впадает	Расстояние, км		Уклон реки, ‰		Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средняя высота водосбора, м	Средний уклон водосбора, ‰	Заболоченность, %	Лесистость, %	Распаханность, %
			от наиболее удаленной точки речной системы	от истока (начала) реки	средний	среднезвеньев-пешенный						
	с. Дворянка											
5239	Комиссаровка (Синтухэ) – с. Ильинка	оз. Ханка	137	86	6,1	2,6	2 080	375		7	39	
	Комиссаровка (Синтухэ) – устье	оз. Ханка	162	111	5,3	2,2	2310	352		8	36	
5242	Большие Усачи – с. Первомайское	оз. Ханка	25	25	9,3	4,2	237	228	99,8		14	
	Большие Усачи – устье	оз. Ханка	46	46	5,7	2,2	304	202	85,9		11	
	Тур	оз. Ханка					181/ 41,5*					

\*на территории КНР (по данным М. Г. Васьковского)

Главной целью расчетов являлось получение непрерывных стоковых рядов по замыкающим створам основных рек, впадающих в оз. Ханка, Спасовка, Илистая, Мельгуновка, Комиссаровка, Большие Усачи. Для бассейна р. Спасовка в качестве расчетного замыкающего створа был принят створ с. Гайворон, расположенный в 16 км от устья. Сток с бассейна р. Илистая учитывался по данным наблюдений в створе у с. Халкидон, расположенного в 66 км от устья, и по данным наблюдений по посту р. Черниговка – с. Черниговка, которая является притоком р.Илистой, впадающей ниже с. Халкидон. Для бассейна р. Мельгуновка в качестве замыкающего створа был принят створ у пос. Луговой, расположенный в 29 км от устья; для бассейна р. Комиссаровка – створ у с. Ильинка, расположенный в 25 км от устья; для р. Большие Усачи – с. Первомайское, в 21 км от устья. В *таблице 6.3* даны пункты гидрологических наблюдений по которым выполнялось приведение стоковых рядов к многолетнему ряду.

Основная часть притока речных вод с российской части водосбора в оз. Ханка приходится на р. Илистая, ее доля в общем поверхностном притоке составляет 35 % от общего притока речных вод с российской части водосбора.

В соответствии с изложенной выше методикой были рассчитаны погодичные значения притока основных рек с российской части водосбора в озеро. Результаты расчетов за 1949–2015 гг. представлены на *рисунке 6.2*.

*Таблица 6.3*

Пункты гидрологических наблюдений по которым выполнялось приведение стоковых рядов к многолетнему ряду

Код поста	Название водного объекта и пункта наблюдений	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Период наблюдений
5193	р. Спасовка (Сантахеза) – с. Гайворон	1200	01.01.1912(16.04.1945) – 31.05.1959
5211	р. Илистая (Лефу) – с. Халкидон	4030	с 29.08.1914 (09.11.1939)
5218	р. Черниговка – с.Черниговка (ж.д. мост)	322	15.04.1942(01.01.1955) – 10.10.1998
5223	р. Мельгуновка (Мо) – пос. Луговой	3450	20.04.1913(28.06.1962) – 01.08.1996
5239	р. Комиссаровка – с. Ильинка	2080	с 14.07.1913 (15.10.1962)
5242	р. Большие Усачи – пос. Первомайское	237	08.07.1959 – 11.11.1991

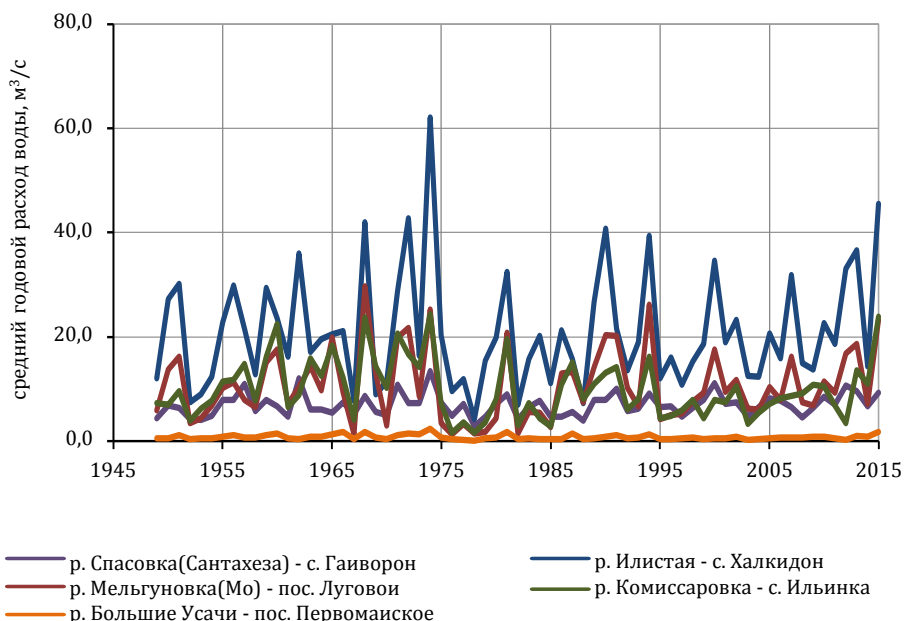


Рисунок 6.2 – Графики хронологического хода среднегодовых расходов воды рек

*Приток с территории, неосвещенной данными гидрометрических наблюдений.* Гидрометрические наблюдения обычно ведутся на крупных водотоках. Поэтому наблюдениями освещается только часть водосбора. Освещенность площади водосбора инструментальными измерениями оз. Ханка составляет 72 %.

Неизученная часть водосбора оз. Ханка включает в себя бассейны отдельных рек, ручьев, межбассейновое пространство, лишенное выраженной гидрографической сети; приустьевые участки рек, расположенные ниже гидрометрических створов.

Оценка притока с неизученной площади водосбора оз. Ханка как для нижних участков рек, так и для малых водотоков, впадающих непосредственно в озеро, произведена с учетом распределения по бассейну модуля стока рек. Такой подход к расчету притока обусловлен тем, что неосвещенная часть водосбора озера, включая малые водотоки, примыкает, либо близко расположена к замыкающим створам рек – основных притоков озера.

Сведения о водосборной площади оз. Ханка, неосвещенной данными гидрометрических наблюдений, приведены в *таблице 6.4*. Из этих данных следует, что для рассматриваемой части водосбора озера его площадь, неосвещенная данными наблюдений, составляет 4 373 км<sup>2</sup> (28 %), из них 1 857 км<sup>2</sup> (12 %) приходится на нижнюю часть водосборов основных рек, от замыкающих створов до устья, 2 335 км<sup>2</sup> (15 %) – на бассейны малых притоков, впадающих в озеро и 181 км<sup>2</sup> (около 1 %) на бассейн трансграничной р. Тур.

Погодичные значения притока р. Тур в озеро были рассчитаны приближенно с использованием модулей годового стока р. Большие Усачи (площадь водосбора 237 км<sup>2</sup>), принятой в качестве аналога, с учетом площади водосбора, расположенной в пределах РФ.

Средний многолетний приток в оз. Ханка с российской территории составил 1,87 км<sup>3</sup> (для периода 1949–2015 гг.), наибольший приток наблюдался в 1974 г. (4,97 км<sup>3</sup>), наименьший – в 1978 г. (0,38 км<sup>3</sup>).

*Приток с китайской территории.* На китайской территории непосредственно в оз. Ханка впадают 5 рек, включая пограничную реку Тур с общей площадью водосбора 457 км<sup>2</sup>. Данные гидрометрических наблюдений на них отсутствуют.

Оценка суммарного притока с неизученной площади водосбора оз. Ханка для китайской части бассейна ориентировочно произведена по модулю стока реки-аналога (р. Большие Усачи). В среднем для рек, расположенных на китайской территории бассейна оз. Ханка, поверхностный приток речных вод оценен в 0,05 км<sup>3</sup> (для периода 1949–2015 гг.). На *рисунке 6.3* приведен хронологический график годовых объемов притока речных вод в оз. Ханка с территории КНР.

Полученные данные по притоку рек были использованы при составлении годовичного водного баланса за период 1949–2015 гг.

Таблица 6.4

Сведения о водосборной площади оз. Ханка, неосвещенной данными гидрометрических наблюдений, км<sup>2</sup>

Река-пункт	Площадь водосбора реки до гидрометрического створа	Общая площадь водосбора реки (до устья)	Площадь водосбора, неосвещенная данными наблюдений от общей площади бассейна	
			км <sup>2</sup>	%
р. Спасовка - с. Гайворон	1 200	1 260	60	0,4
р. Илистая – с. Халкидон	4 030	5 470	1 440	9,4
р. Мельгуновка – пос. Луговой	3 450	3 510	60	0,4
р. Комиссаровка – с. Ильинка	2 080	2 310	230	1,5
р. Большие Усачи – с. Первомайское	237	304	67	0,4
Итого:			1 857	12
Общая площадь, неосвещенная данными наблюдений (низовья рек и бассейны небольших притоков) и р. Тур			2 335	15
Итого по бассейну			4 373	28

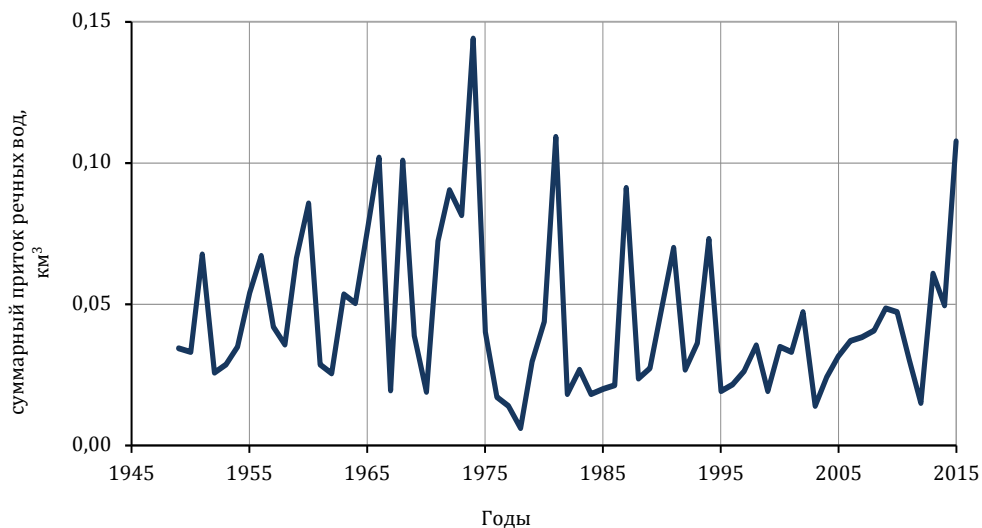


Рисунок 6.3 – Годовой приток речных вод в оз. Ханка с части водосбора, расположенный на территории КНР за 1949–2015 гг.

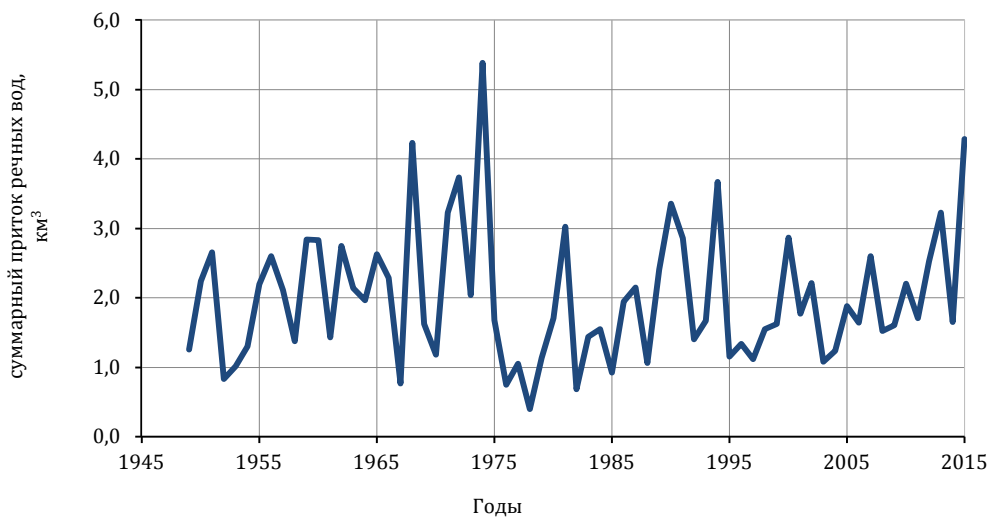


Рисунок 6.4 – Суммарный приток речных вод в оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

На рисунке 6.4 приведен график суммарного притока речных вод в оз. Ханка за 1949–2015 гг., включающий приток с российской и китайской территорий. В среднем за этот период в озеро поступило  $1,92 \text{ км}^3/\text{год}$ . При этом приток с российской части водосбора равен  $1,87 \text{ км}^3$ , приток с китайской территории оценен в  $0,05 \text{ км}^3$ .

Максимальное за весь расчетный период поступление воды в озеро наблюдалось в 1974 г. и составило  $5,09 \text{ км}^3$ . При этом объем притока речных вод с российской



части бассейна был равен  $4,95 \text{ км}^3$ , приток с китайской территории  $0,14 \text{ км}^3$ . В экстремальном маловодном 1978 г. приходная составляющая составила  $0,39 \text{ км}^3$ , приток российских рек –  $0,38 \text{ км}^3$  приток с китайской территории  $0,01 \text{ км}^3$ .

В многолетнем ходе поверхностного притока в оз. Ханка за период 1949–2015 гг. четко прослеживаются 3 фазы подъема и 3 фазы спада значений суммарного поверхностного притока в оз. Ханка (рисунок 6.5): 1949–1954 гг. – спад; 1957–1974 гг. – подъем, 1975–1988 гг. – спад; 1989–1994 гг. – подъем; 1995–2005 гг. – спад; 2006–2015 гг. – подъем. Продолжительность периода устойчивого повышенного притока в озеро изменяется от 20 лет (1955–1974 гг.) до 6 лет (1989–1994 гг.), при этом величины среднегодового притока в периоды повышенной водности довольно близки (диапазон изменения составляет от  $2,26 \text{ км}^3$  до  $2,44 \text{ км}^3$ ) и отличаются не более чем на 10 %. Средняя продолжительность периода устойчивого пониженного притока в озеро за период многолетних наблюдений составляет порядка 15 лет, при этом величины среднегодового притока в озеро в периоды пониженной водности отличаются более, чем на 20 %.

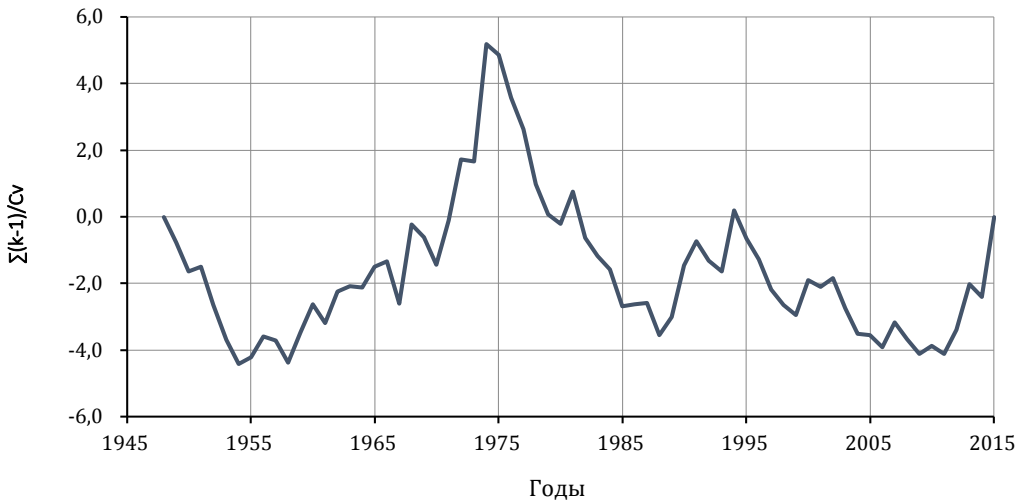


Рисунок 6.5 – Разностная интегральная кривая значений суммарного годового притока речных вод в оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

За период современного устойчивого подъема оз. Ханка (выше его среднемноголетнего значения) – 2007–2015 гг., приток речных вод в озеро оказался выше нормы на 18 %. При этом с российской части бассейна поступило поверхностного стока на 19 % больше, а с территории КНР – на 7 %.

Для оценки однородности притока за 1949–2015 гг. использовались статистические критерии Стьюдента (для средних значений) и Фишера (для дисперсий). Из полученных результатов следует, что ряд за период 1949–2015 гг. по критерию

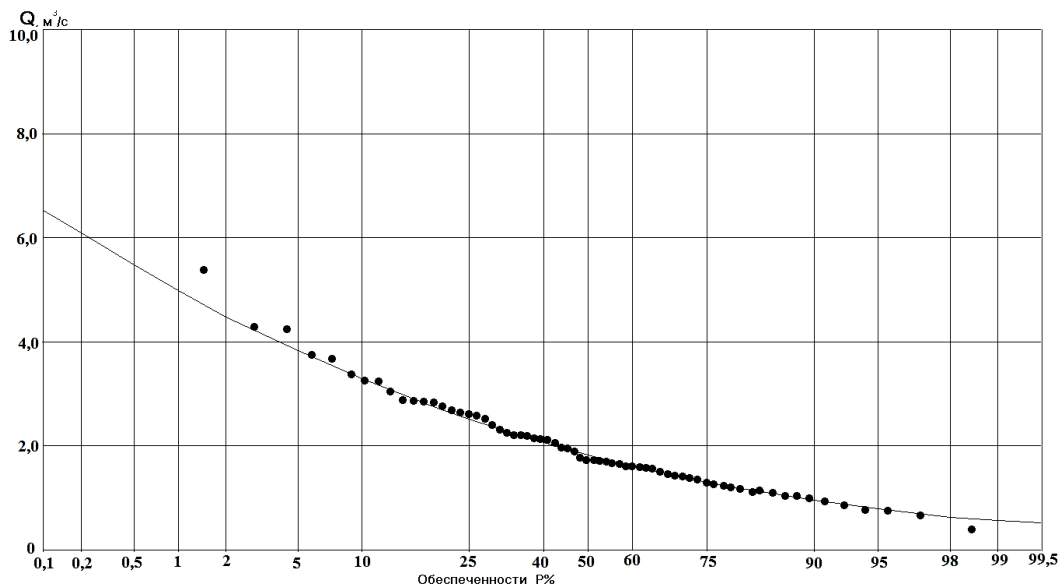
Фишера и Стьюдента однороден. На рисунке 6.6 представлена кривая распределения суммарного общего годового притока речных вод в оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

В *таблице 6.5* приведены статистические характеристики суммарного годового притока речных вод в оз. Ханка с российской части его бассейна за период 1949–2015 гг.

*Таблица 6.5*

Статистические характеристики и расчетные значения суммарного годового притока речных вод в оз. Ханка с российской части его бассейна за период 1949–2015 гг.

Q <sub>ср</sub>	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	R(1)	Обеспеченности, %								
				1	5	10	25	50	75	90	95	99
1,87	0,48	1,11	0,03	4,62	3,56	3,06	2,30	1,71	1,21	0,89	0,73	0,52



*Рисунок 6.6* – Кривая распределения суммарного речного притока в оз. Ханка с российской части его бассейна за период 1949–2015 гг.

## 6.2 Подземный приток

Подземный приток включает в себя подземные воды, дренируемые водоемами. Основная масса этих вод дренируется речной сетью бассейна и поступает в водоем вместе с поверхностным притоком. Отток (фильтрация) происходит обычно в прибрежной зоне водоема в тех случаях, когда уклон водоносных пластов направлен в сторону от водоема, за пределы его подземного

водосбора. Аккумуляция в грунтах берегов наблюдается при переменном уклоне грунтовых вод на прибрежных участках, где они периодически подпираются или дренируются со стороны водоема в связи с изменением его уровня [35].

У крупных водоемов равнинных районов подземный приток по своему удельному весу невелик и, кроме того, он практически полностью учитывается совместно с поверхностным стоком, поскольку равнинные реки дренируют неглубоко расположенные водоносные пласты. Подземный отток – более редкое явление на внутренних водоемах. Временная аккумуляция воды в грунтах берегов в общем приходе – расходе воды, как правило, невелика [35].

На территории Ханкайской низменности глубина залегания грунтовых вод незначительна и колеблется, в среднем от 2 до 10 м. Как правило, на побережье оз. Ханка верховодка вскрывается скважинами на глубине 1–2 м, а с глубины 4–6 м обнаруживается более устойчивый песчаный водоносный горизонт. Глубина копаных колодцев обычно не превышает 10 м [45].

Приток подземных вод в озеро происходит главным образом по западному берегу, с восточного и юго – восточного берегов притока подземных вод нет. Основным источником питания водоносных горизонтов являются осадки [46]. Сведения о количественных характеристиках притока подземных вод в озеро, их оттока и временной аккумуляции воды в грунтах берегов в литературе отсутствуют. По мнению М. Г. Васьковского суммарная величина подземного притока и оттока из озера в многолетнем разрезе близка к «0» [1] .

### 6.3 Осадки

Для определения осадков, выпадающих на поверхность озера, используются данные наблюдений на прибрежных метеорологических станциях. Оценка средних многолетних сумм осадков может быть выполнена с использованием региональных карт их норм. Впервые оценка средних годовых сумм осадков была выполнена Устиновской Л. М. [46] за период 1930–1952 гг. и составила 507 мм.

Серпик Б. И. в книге «Водные ресурсы рек Южного Приморья Дальнего Востока» [4] при определении количества осадков, выпадающих на поверхность озера, были использованы данные метеорологической станции Астраханка за 16 лет, приведение к многолетнему ряду было выполнено с привлечением данных по станции Гродеково. Средние годовые осадки за период 1932–1952 гг. составили 488 мм.

В монографии «Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза» [32] при составлении водного баланса оз. Ханка среднемноголетняя сумма годовых осадков на поверхность озера была получена по карте их нормы, построенной по материалам наблюдений на дождемерах по 1950 г. включительно, с введением поправок на выдувание и смачивание. В соответствии с приведенными в этой

работе данными, средние многолетние годовые суммы осадков составили 615 мм. В работе М. Г. Васьковского [1] годовые суммы осадков, выпадающие на поверхность озера за период 1949–1971 гг., рассчитаны по данным трех береговых станций (Турий Рог, Астраханка и Новосельское) с учетом распределения осадков по территории, полученного с использованием наблюдений на станциях и постах, расположенных в бассейне оз. Ханка. Годовые суммы осадков рассчитывались не за календарный год, а за период с 01.12 предыдущего года по 30.11 текущего года. К величине осадков за ранние годы, измеренным дождемером, был введен переходной коэффициент от показаний дождемера к показаниям осадкомера, а за 1949–1966 гг. – поправочный коэффициент на смачивание прибора. Поправочный коэффициент на ветровой недоучет осадков не был принят в расчет. По данным Васьковского М. Г. [1], в теплый период этот коэффициент обычно не превышает 2–3 %, а в зимний период достигает 40–68 %. В последнем случае, по мнению автора, осадки выпадают при сильных ветрах и сносятся с поверхности льда озера. Данный тезис вызывает сомнение. Так, по данным, приведенным в монографии [35], на водоемах имеет место как сдувание с поверхности ледяного покрова, так и принос его с окружающей суши. Эти противоположные процессы на крупных озерах в целом компенсируются, а учитывая, что вся прибрежная зона больших водоемов по отношению к их общей площади невелика, то максимальное накопление (сдувание) осадков не может существенно повлиять на распределение их по акватории.

Отсутствие островных станций на оз. Ханка, а также на северном и северо-восточном его побережье затрудняет определение годовых сумм осадков. В связи с этим в работе [1] сделана попытка построения карт изогий годовых сумм осадков для акватории озера с использованием данных наблюдений за осадками в российской части бассейна. Среднее количество осадков, выпавших в течение года на поверхность озера, определялось планиметрированием карт изогий. Сумма их за период с 1949–1971 гг. изменялась от 412 до 788 мм, а в среднем за этот период составила 567 мм. Следует отметить, что определение количества осадков, выпадающих на поверхность озера, с учетом особенностей их пространственного распределения на основе привлечения максимально возможного числа осадкомерных пунктов, расположенных в прибрежной части водоема и на его водосборной площади, является, в принципе, наиболее правильным. Однако, построение карт изогий требует наличия достаточно плотной сети осадкомерных пунктов и применения адекватных методов анализа данных наблюдений. К сожалению, в работе [1] отсутствуют какие-либо сведения о методике построения изогий, и автор отмечает, что «приведенные изогии являются в известной степени условными».

Аналогичным образом годовые суммы осадков на поверхность озера были рассчитаны в Приморском УГМС [36] за 1972–1980 гг. С учетом этих данных средние за период 1949–1980 гг. годовые суммы осадков составили 570 мм.

В работе [40] приведены данные по среднему годовому водному балансу озера, в том числе и осадкам за период 1949–1980 гг., полностью соответствующие данным, представленным в [36].

В книге «Водные ресурсы России и их использование» [38] Т. П. Гронской средние осадки на поверхность озера за период 1981–2005 гг. оценены в  $2,59 \text{ км}^3$  (630 мм)».

В *таблице 6.6* приведены обобщенные сведения по средним многолетним годовым осадкам на поверхность оз. Ханка по данным различных источников.

*Таблица 6.6*

Годовые осадки на поверхности оз. Ханка, по данным различных источников

Автор/источник	Расчетный период	Осадки		Примечания
		мм	км <sup>3</sup>	
Устиновская Л. М. [46]	1930–1952	507		Без введения поправок
Серпик Б. И. [4]	1930–1952	488	2,04	По м/ст Астраханка (аналог м/ст Городеково), без введения поправок
«Водные ресурсы и водный баланс» [32]	1891–1950	615	2,57	По картам, с введением поправок на выдувание и смачивание
К расчету водного баланса оз. Ханка [46]	1949–1971	567	2,30	Рассчитаны по трем м/ст (Турий Рог, Астаханка, Новосельское) без поправок на выдувание
Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [36]	1949–1980	570	2,34	Осадки приняты по методике [32]
Водные ресурсы и их использование [40]	1949–1980	570	2,34	Осадки приняты по данным [1]
Водные ресурсы России и их использование [38]	1949–1980	570	2,34	Осадки приняты по данным [1] С введением всех видов поправок
	1981–2005	630	2,59	

В зависимости от принятой методики расчета и периода осреднения оценки осадков находятся в пределах от 507 до 630 мм. Столь значительный разброс в оценках средних многолетних годовых сумм осадков, выпадающих на поверхность озера, объясняется, главным образом, принятыми авторами подходами к их корректировке (переход от показаний дождемера к осадкомеру, поправки на выдувание и смачивание). При введении всех видов поправок годовые суммы осадков, в зависимости от периода осреднения, составляют 615–630 мм.

Как уже отмечалось выше, наиболее правильным при определении осадков, выпадающих на водную поверхность озера, является учет распределения осадков по его акватории. Из-за отсутствия данных по измеренным осадкам непосредственно

на акватории водоема и малочисленности данных прибрежных наблюдений, в отделе исследований изменения климата ГГИ была выполнена оценка годовых сумм осадков с учетом особенностей их пространственного распределения, полученного на основе привлечения максимально возможного числа осадкомерных пунктов в районе расположения озера и использования современных методов анализа пространственного распределения осадков по территории [48]. Были привлечены сведения по осадкомерным пунктам не только в пределах водосборной площади озера, но и находящиеся за ее пределами. В расчетах использовались данные 21 метеостанций, в том числе расположенных на территории КНР. Сравнительный анализ результатов расчетов осадков, выпадающих на поверхность озера, полученных различными методами, показал, что оценки средних многолетних осадков отличаются очень незначительно (на 2–3%).

В настоящей работе для определения осадков, выпадающих на поверхность озера, использовались данные по метеорологическим станциям, расположенным на его юго-западном берегу (м/ст Астраханка), на северо-западном (м/ст Турий Рог) и станции (м/ст Новосельская), расположенной в 6 км на востоке от побережья. Ввиду того, что осадкомеры недоучитывают осадки, так как их часть теряется на смачивание осадкомерного ведра и на испарение из него, а также выдуваются или не полностью улавливаются в результате ветрового воздействия, при воднобалансовых расчетах обязательным является введение всех видов поправок в соответствии с рекомендациями [47], [49], регламентирующими их размеры в зависимости от вида осадков и защищенности пунктов наблюдений. Кроме того, учитывая, что в 1950-х годах произошла замена дождемеров с защитой Нифера на осадкомеры Третьякова, необходимо вводить коэффициент для пересчета показаний дождемера к показаниям осадкомера [47].

В настоящей работе все виды поправок были введены к измеренным месячным суммам осадков и в результате получены «исправленные» годовые их суммы по каждой метеорологической станции.

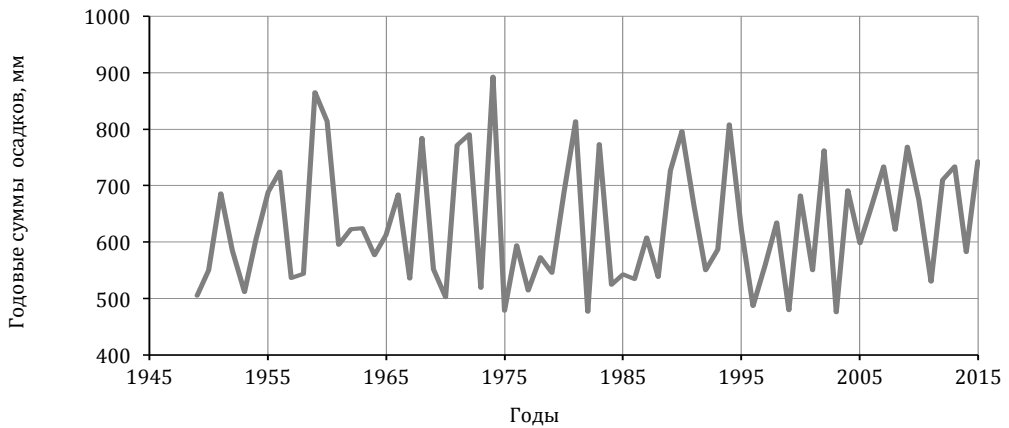
Для проверки достоверности исправленных величин осадков была также использована методика, разработанная в ГГО [50] [51], для приведения к однородности рядов осадков на суточном уровне.

Выполненные расчеты показали, что суммы месячных осадков, скорректированных по методике ГГО, отличаются от величины осадков со стандартными поправками  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ . Однако, при суммировании за год эта разница практически не выявляется, поскольку погрешности для холодного и теплого периодов года почти полностью нивелируют друг друга.

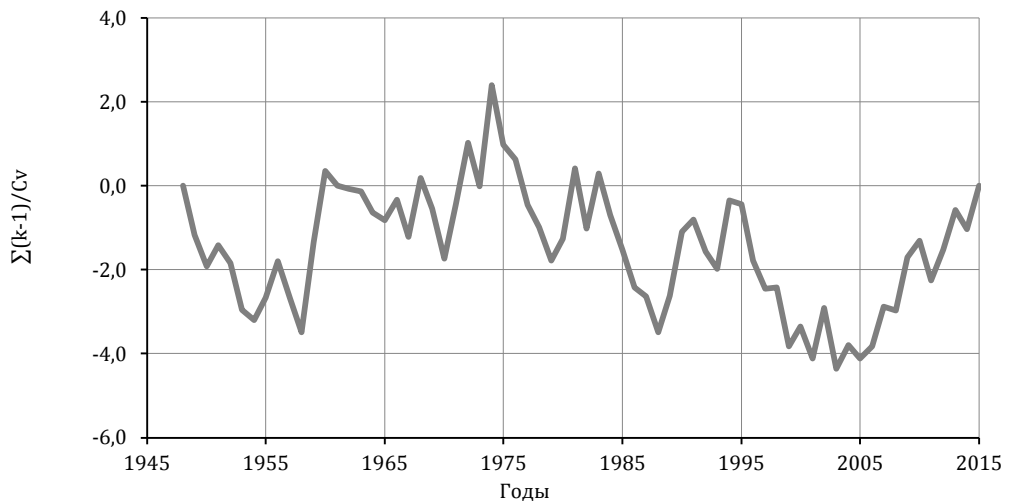
Таким образом, были получены непрерывные ряды месячных и годовых сумм осадков по метеорологическим станциям и определена сумма осадков, выпадающих

на акваторию озера. На *рисунке 6.7* приведен график годовых сумм осадков на поверхность оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

На графике разностной интегральной кривой сумм осадков (*рисунк 6.8*) на поверхность оз. Ханка за период 1949–2015 гг. хорошо прослеживаются 4 фазы роста годовых сумм осадков: 1957–1974 гг., 1979–1983 гг., 1989–1994 гг. и 2006–2015 гг., а также наблюдаются 4 выраженных фазы падения годовых сумм осадков: 1949–1954 гг., 1975–1978 гг., 1983–1988 гг., 1995–2005 гг. Продолжительность периода повышенных годовых сумм осадков изменяется от 20 лет (1955–1974 гг.) до 4 лет (1979–1982 гг.), а продолжительность периода пониженных годовых сумм осадков изменяется от 10 лет (1995–2004 гг.) до 4 лет (1975–1978 гг.).



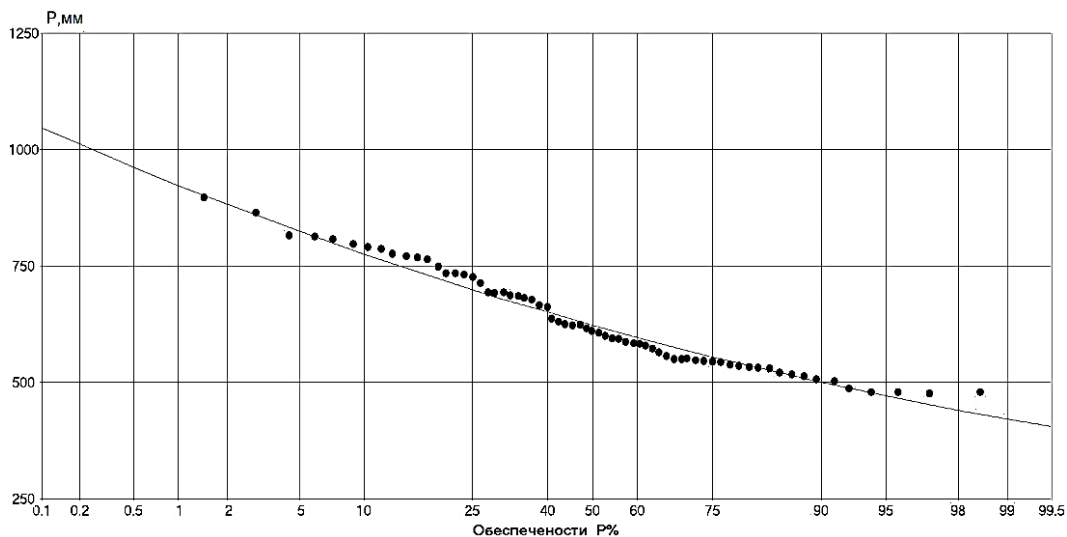
*Рисунок 6.7* – Многолетние колебания годовых сумм осадков на поверхность оз. Ханка за период 1949–2015 гг.



*Рисунок 6.8* – Разностная интегральная кривая годовых сумм осадков на поверхность оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

Следует отметить, в целом выраженную синфазность тенденций изменения интегральных кривых годовых сумм осадков и притока в озеро Ханка. Эта синфазность хорошо прослеживается в периоды 1957–1974 гг., 1989–1994 гг. и 2006–2015 гг. Существенно слабее она выражена в период 1979–1983 гг.

На *рисунке 6.9* представлена кривая распределения годовых сумм осадков за период 1949–2015 гг.



*Рисунок 6.9* – Кривая распределения годовых сумм осадков за период 1949–2015 гг.

В *таблице 6.7* приведены статистические характеристики годовых сумм осадков за период 1949–2015 гг.

*Таблица 6.7*

Статистические характеристики и расчетные значения годовых сумм осадков на акваторию озера за период 1949–2015 гг.

Элемент водного баланса	$P_{cp}$	$C_v$	$C_s$	$R(1)$	Обеспеченности, %								
					1	5	10	25	50	75	90	95	99
Осадки, мм	632	0,17	0,51	0,03	923	824	775	699	622	554	500	471	421

## 6.4 Испарение

Испарение – один из важнейших и трудно определяемых элементов водного баланса. В настоящее время нет достаточно надежных способов прямого измерения его величины. Используемые на сети Росгидромета испарители ГИ-3000 и испарительные бассейны площадью 20 м<sup>2</sup> в силу существенных различий их размеров по сравнению с реальными водоемами, как правило, завышают величину испарения. Однако, массовые наблюдения за испарением в комплексе с сопутствующими наблюдениями температурой, влажностью и дефицитом влажности воздуха, температурой воды и



скоростью ветра в непосредственной близости к испарителю позволили выявить основные метеорологические факторы, обуславливающие интенсивность испарения, и разработать эмпирические методы расчета испарения на основе использования достаточно надежно определяемых метеорологических элементов.

В районе оз. Ханка наблюдения за испарением с водной поверхности по испарительному бассейну 20 м<sup>2</sup> и испарителю ГГИ-3000 проводятся на озерной гидрометеорологической станции (ОГМС) Астраханка с 1957 г. Кроме того, с 1956 по 2010 гг. наблюдения за испарением проводились на метеостанции (м/ст) Турий Рог по испарителю ГГИ-3000. На этих же метеостанциях выполняется полный комплекс метеорологических наблюдений.

На озере действуют 2 озерных гидрологических поста, на которых ведутся наблюдения за уровнем озера, температурой поверхности воды и ледовыми явлениями. Силами ОГМС Астраханка проводятся также наблюдения на акватории озера. Полный комплекс гидрометеорологических наблюдений предоставляет уникальную возможность сопоставить наблюденные и рассчитанные величины испарения, оценить надежность использования эмпирических методов расчета и, в конечном счете, получить достаточно достоверный многолетний ряд величины испарения для анализа изменчивости испарения за длительный период и составления водного баланса озера.

История изучения и оценки испарения с поверхности озера связана, прежде всего, с расчетами его водного баланса.

Первая известная оценка элементов водного баланса оз. Ханка была сделана Р. О. Юргенсоном [39] в работе, посвященной судоходности р. Амур и его притоков. Разница между оценкой общего поверхностного притока в озеро и стока по р. Сунгач за 1890 г. отнесена Р. О. Юргенсоном за счет испарения. Он впервые обратил внимание на важность испарения для оценки водного баланса озера. Однако в его работе не были учтены осадки на поверхность озера, и характеристики испарения, полученные Р. О. Юргенсоном, не могут рассматриваться как достоверные. Поэтому в сводной таблице, где приведены элементы баланса озера, полученные разными исследователями, характеристики испарения, оцененные Юргенсоном, не приведены.

Расчет водного баланса озера за многолетний период (1913–1932 г.) был выполнен А. И. Булгаковым [1]. Согласно полученным им результатам разница между общим поверхностным притоком в озеро и стоком через р. Сунгач за 19 лет составила в среднем 3.1 м<sup>3</sup>/сек или 24 мм. Из полученных результатов автор сделал вывод, что основную роль в водном балансе оз. Ханка должны играть осадки и испарение, однако их величины им не определены.

Оценки величины испарения для оз. Ханка появились только в 1950-х годах. Средняя величина испарения за период 1930–1952 г., определенная Л. М. Устиновской (см. [1]), составила 522 мм, или 2,10 км<sup>3</sup> в год. К сожалению, сведения о том, каким образом получена эта величина, отсутствуют.

Средняя многолетняя величина испарения с апреля по октябрь, полученная Б. И. Серпик (см. [4]) в 1955 г., составила 553 мм или  $2,22 \text{ м}^3$  в год. Испарение было рассчитано по формуле Б. Д. Зайкова [3], которая позднее практически в неизменном виде вошла как основная в «Указания по расчету испарения...» [52]. Исходная информация о влажности воздуха и температуре воды для расчета испарения получена осреднением за 10 предшествующих расчетам лет. Скорость ветра над водной поверхностью принята по данным З. А. Викулиной [35] для лесной зоны крайнего юго-востока.

В монографии «Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза» 1967 г. [8] в качестве оценки средней многолетней величины испарения с оз. Ханка приведено значение 674 мм или  $2,82 \text{ км}^3$  в год. Расчетный период и метод получения оценок в данной монографии не указан.

Наиболее полно методика оценки испарения для оз. Ханка приведена в монографии М. Г. Васьковского [1], в которой даны также результаты расчетов его величины. За период с 1949 по 1971 гг. им выполнены расчеты испарения в соответствии с утвержденными к тому времени «Указаниями по расчету испарения с поверхности водоемов» [52]. Величина испарения для теплого периода года оценивалась по «основной» расчетной формуле, для зимнего периода (середина ноября – середина апреля) величина испарения рассчитывалась в соответствии с рекомендациями «Указаний по расчету испарения...» и монографии М. П. Тимофеева [52], [53]. Средняя величина годового испарения составила 584 мм.

Полученные М. Г. Васьковским оценки позволили также проследить годовые изменения величины испарения для оз. Ханка за расчетный период. М. Г. Васьковский провел сравнение полученных им оценок испарения за теплый период года (май-октябрь) с наблюдаемыми величинами по испарительному бассейну  $20 \text{ м}^2$ , установленному на метеостанции Астраханка, и показал, что отношение расчетной величины испарения с поверхности озера к наблюдаемой по бассейну составила 0,8–0,9. Кроме того, проанализировав расходную часть водного баланса озера (в том виде, в каком он рассматривается в [1]), автор пришел к выводу, что в расходной части преобладает испарение (50–75 %).

Полученное в [1] среднее многолетнее значение величины испарения целиком приведено в монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» 1974 г. [54].

В справочнике-монографии «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» [36] приведены значения испарения за период с 1949 по 1980 гг. Поскольку для периода 1949–1971 гг. авторы используют результаты М. Г. Васьковского [1], можно предположить, что за период с 1972 по 1980 гг. расчеты выполнены по той же методике, которая использована в монографии [1]. Средняя величина испарения за этот период составила 620 мм или  $2,54 \text{ км}^3$  в год. Однако, годовые значения величины испарения за период 1972–1980 гг. вызывают

серьезные сомнения из-за необъяснимо высоких значений относительно средней величины испарения в целом с 1949 по 1980 гг. Такой результат может объясняться либо отличной от М. Г. Васьковского методики подготовки исходных данных, либо использованием формулы расчета испарения, отличающейся от приведенной в [1]. Эти факторы могут в результате привести к нарушению однородности полученного временного ряда годового испарения.

К сожалению, опубликованные в монографии [36] годовые значения испарения за период с 1941 по 1980 гг. без критического анализа использованы и в последующих публикациях. Так, в монографии «Водные ресурсы СССР и их использование», 1987 г. [40] приведено среднее значение испарения за период 1941–1980 гг.  $2,54 \text{ км}^3$  в год, совпадающее с опубликованным в вышеуказанной монографии.

Оценка испарения с водной поверхности оз. Ханка методом теплового баланса выполнена в 1988 г. И. В. Меженной [55] за сезон с мая по октябрь с 1974 по 1980 гг. В отсутствие наблюдений за элементами радиационного баланса на озере использованы данные актинометрических наблюдений на метеостанции Новосельское. Сравнение значений величины испарения, полученных методом теплового баланса, методом ГГИ [52] и по результатам натуральных наблюдений, позволили автору сделать вывод о том, что метод теплового баланса существенно завышает величину испарения, а результаты, полученные по методу ГГИ, лучше согласуются с наблюдаемыми значениями.

Величина среднего многолетнего испарения для оз. Ханка, приведенная в монографии «Водные ресурсы России и их использование» 2008 г. [38], за период 1949–1980 гг. составляет  $2,54 \text{ км}^3$  в год или 624 мм, а за период 1981–2005 гг. –  $2,75 \text{ км}^3$  в год или 679 мм. При этом изменения объема озера за эти периоды составили  $-0,06 \text{ км}^3/\text{год}$  в первый расчетный период и  $+0,08 \text{ км}^3/\text{год}$  в 1980–2005 гг. В соответствии с приведенной в монографии структурой водного баланса за 1981–2005 гг. испарение составляет 59,4% расходной части водного баланса озера. Отмечается рост и значительные межгодовые колебания величины испарения с 1981 по 2005 гг.

А. Н. Постников [56] в работе 2012 г. методом теплового баланса рассчитал норму испарения с поверхности оз. Ханка за безледный период с середины апреля по конец ноября по данным актинометрических наблюдений на метеостанции Сантахеза (с 1972 г. – Новосельская), которая составила 726 мм. Относительная погрешность оценки испарения этим методом по расчетам автора составила 17 %.

Однако, в качестве «принятой» за норму автор приводит величину испарения 624 мм – наиболее близкую из опубликованных, объясняя это тем, что «если значения испарения, полученные независимыми друг от друга способами, оказываются близкими, то у этих двух значений больше шансов оказаться ближе к истинному значению, чем у остальных». В статье, к сожалению, не названы авторы «принятых» значений испарения, периодов и способов их определения, а также не приведен период, к которому относится авторский расчет испарения.

В *таблице 6.8* приведена величина среднемноголетнего испарения, полученная различными авторами. Диапазон значений величины испарения с водной поверхности оз. Ханка по данным различных исследований составил от 522 до 983 мм в год.

*Таблица 6.8*

Величина испарения с поверхности оз. Ханка, полученная разными авторами

Автор/источник	Расчетный период	Величина испарения, мм	Примечание
Устиновская Л. М., 1954 г. [1]	1930–1952 (годовое испарение)	522	Метод неизвестен
Серпик Б. И., 1955 г. [4]	многолетнее (сезон апрель–октябрь)	553	Метод неизвестен
Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза, 1967 г. [32]	многолетнее (годовое испарение)	674	Метод и период неизвестен
Васьковский М. Г., 1978 г. [1]	1949–1971 гг. (годовое испарение)	584	В соответствии с «Указаниями по расчету испарения с поверхности водоемов» [52]
Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, 1987 г. [36]	1949–1980 гг. (годовое испарение)	620	1949–1971 гг. – данные М. Г. Васьковского [1] [36]; 1972–1980 гг. метод неизвестен
Меженная И. В., 1988 г. [55]	1974–1980 гг. (сезон май–октябрь)	639–983	Метод теплового баланса
Водные ресурсы России и их использование, 2008 г. [38]	1949–1980 гг. 1981–2005 гг. (годовое испарение)	620 677	По монографии [57] Метод неизвестен
Постников А. Н. [56]	Многолетнее за безледный период с середины апреля по конец ноября	624 726	Метод теплового баланса

К сожалению, в большом количестве работ отсутствует описание использованных методов, а полученные оценки характеризуют среднюю многолетнюю величину годового испарения или испарения за теплый период года (определяемый каждым автором по-разному).

Оценки, полученные по методу теплового баланса, оказались существенно выше рассчитанных другими методами. Вызывает также сомнения рост величины среднего годового испарения для периода 1981–2005 гг. в монографии [38].

При наличии большого разброса величины испарения для исследования их многолетних изменений было необходимо провести независимую оценку погодических

значений его величины с использованием одинакового методического подхода для всего исследуемого периода (1949–2015 гг.).

В настоящей работе расчет величины годового испарения выполнен по методике ГГИ [52]. Этот же метод был применен и М. Г. Васьковским [1], что позволило использовать часть эмпирических коэффициентов, полученных им для перехода от данных прибрежных гидрометеорологических станций к акватории озера в целом.

Расчетные значения сопоставлены с результатами наблюдений за испарением с водной поверхности по испарителям ГГИ-3000, установленным на станциях Турий Рог (1956–2010 гг.) и Астраханка (1957–2015 гг.), и по испарительному бассейну 20 м<sup>2</sup> на станции Астраханка (1957–2015 гг.), что позволило оценить достоверность оценок, полученных при использовании полуэмпирических формул, и проанализировать зависимость величины испарения в данном районе от влияющих на его величину факторов.

Для оценки величины испарения с акватории оз. Ханка использованы данные наблюдений на трех гидрометеорологических станциях, расположенных вблизи озера (таблица 6.9), двух озерных гидрологических постах Астраханка и Турий Рог, имеющих наиболее продолжительные ряды, и данные наблюдений за гидрологическими и метеорологическими элементами, выполняемых в открытой части озера силами ОГМС Астраханка.

Таблица 6.9

Описание метеорологических станций, данные наблюдений на которых использованы для расчета испарения

Название станции (старое название)	Координатный номер	Синоптический номер	Высота репера, м БС-77	Высота флюгера, м	Год открытия станции	Дата замены дождемера на осадкомер	Информация о переносах станции
Астраханка (Камень-Рыболов)	4473211	31921	98	10,9	1935	23.05.1952	Декабрь 1934 – на 5 км к Ю, август 1956 – на 150 м к ЮВ, апрель 1975 – на 25 м к ЮЗ.
Новосельское (до 1973 г. Сантахеза)	4483281	31923	73	11,5	1927	16.09.1952	1933 – на 2 км к СВ, август 1996 – переведена в пост, февраль 2015 – 4-х срочные наблюдения.
Турий Рог	4523201	31913	105	11,0	1927	01.08.1950	1933 – на 1 км, 1935 – на 500 м, 1958 – на 2.5 км к Ю, февраль 1997 – III разряд, январь 2003 – восстановлены 8 сроков.

ОГМС Астраханка расположена на юго-западном берегу озера, МС Турий Рог – на северо-западном берегу, а МС Новосельское находится в восточной части озера на р. Спасовка на заболоченной равнине. Несмотря на схожие климатические условия, все станции имеют свои особенности. Так, максимальная норма осадков (625 мм) отмечается на МС Новосельское, наибольшая скорость ветра (3,6 м/с) характерна для ОГМС Астраханка.

Отличаются станции и по направлению преобладающих ветров. Для Астраханки характерны южные и юго-западные ветры (48 %), для Турьего Рога – западные (53 %), а для Новосельского – юго-западные (32 %).

В качестве исходной гидрометеорологической информации для расчета месячного слоя испарения за безледоставный период использованы материалы гидрологических и метеорологических наблюдений с 1949 по 2015 гг.:

- среднемесячные значения температуры воды на озерных гидрометеорологических постах Астраханка и Турий Рог;

- среднемесячные значения температуры поверхности воды в целом по водоему, полученные по результатам наблюдений на гидрологических разрезах и постах;

- даты появления первых и устойчивых ледовых явлений, начала ледостава, начала и конца разрушения ледяного покрова, очищения ото льда акватории по наблюдениям на гидрологических постах;

- средние месячные значения температуры воздуха на метеоплощадках Турий Рог, Астраханка, Новосельское;

- средние месячные значения упругости водяного пара или абсолютной влажности воздуха (с 1966 г. – парциального давления водяного пара) и максимальной упругости водяного пара, определяемой по температуре поверхности воды;

- средние месячные значения скорости ветра различных направлений и повторяемость ветра этих направлений на высоте флюгера.

Для расчета слоя испарения в зимний период (с середины ноября до середины апреля) вместо температуры поверхности воды используются средние месячные значения температуры поверхности снега на этих же станциях.

Для пересчета слоя испарения в объемы использована информация о площади поверхности озера, определенной по среднемесячному уровню озера, вычисленному по наблюдениям на постах Астраханка и Турий Рог.

Использованные для расчета испарения метеорологические и гидрологические характеристики проверены на возможные нарушения однородности, связанные с изменениями методики наблюдений, местоположения метеоплощадок и смены приборов.

Влияние погодных условий и других факторов окружающей среды (например, особенности береговой отмели и наличия ветрового волнения на озере), а также инструментальные погрешности (смена термометров, отсутствие тарировки и т.д.)

нивелируются на месячном уровне и практически не сказывается на используемых данных. Однако некоторые факторы оказали влияние на однородность исходных рядов наблюдений.

Условия метеорологических наблюдений на м/ст Астраханка, Турий Рог и Новосельское практически не подвергались изменениям, связанным с естественным преобразованием самих метеоплощадок (зарастание площадки травой, рост кустарников или деревьев, приводящий к изменению ее защищенности и т.д.). В связи с переносами метеорологических площадок на метеостанциях Астраханка и Турий Рог в 1956 и 1958 годах соответственно, установлено нарушение однородности только рядов характеристик ветра для этих станций. На другие метеорологические элементы эти переносы практически не повлияли.

В то же время такие факторы, как масштабная замена устаревших приборов и оборудования, изменение сроков наблюдений и методов обработки получаемых данных, привели к нарушению однородности рядов наблюдений за характеристиками ветра и осадками. Что касается рядов температуры и влажности воздуха, они в меньшей степени зависят от вышеперечисленных факторов.

Одной из основных причин нарушения однородности рядов характеристик ветра в 1960-х годах считается смена сроков наблюдений на всех метеорологических станциях СССР. С 1 января 1966 г. были введены 8-ми срочные наблюдения взамен 4-х срочных. Примерно с этого же времени расчетные среднесуточные значения скорости ветра заметно уменьшились практически на всех метеостанциях бывшего СССР из-за введения ночных сроков наблюдений, когда скорости ветра минимальные [58].

Различия в величинах скоростей ветра из-за увеличения числа сроков наблюдений были устранены введением поправки минус 10 % к величинам средней месячной скорости ветра за период до 1 января 1966 г. К сожалению, в климатологической литературе отсутствуют количественные показатели уменьшения среднемесячной скорости ветра после 1966 г. по вышеуказанной причине. Косвенное указание на уменьшение расчетных среднесуточных скоростей ветра более чем на 10% с начала 1966 г. по сравнению с предшествующим периодом содержится в Методических указаниях «Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов...» [59]. На примере расчета удельной мощности ветрового потока  $N_e$  по данным наблюдений за разные периоды показано, что за 30-летний период четырехсрочных наблюдений (до 1966 г.) расчетная мощность ветрового потока для условной метеостанции составила 350 Вт/м<sup>2</sup> а за 20-летний ряд восьмисрочных наблюдений (1966–1985 гг.) эта величина составила 300 Вт/м<sup>2</sup>.

Замена простого флюгера с доской на анеморумбометр в 1970-х годах практически не повлияла на однородность рядов среднемесячной скорости ветра и ее повторяемости. Исследования показали, что изменение высоты установки флюгера и его замена на анеморумбометр могут нарушить однородность рядов при скоростях ветра более

14 м/с [18]. В СП 201333.2011 «Нагрузки и воздействия» [60] также отмечено, что при скорости ветра по флюгеру менее 10 м/с замена флюгера на анеморумбометр не нарушает однородности ряда. В связи с тем, что на станциях Астраханка, Турий Рог и Новосельское скорости ветра более 10 м/с практически не отмечаются, а среднегодовые скорости не превышают 5 м/с, замена простого флюгера с доской на анеморумбометр в 1970-х годах не могла нарушить однородность рядов скорости ветра.

Еще одна причина возможного нарушения однородности рядов скорости ветра, связанная с изменениями методики обработки данных наблюдений. С 1970 по 1977 гг. информация о направлениях ветра обобщалась и публиковалась по 16 румбам, а до 1970 г. и после 1979 г. – по 8-ми румбам. Оценка возможных расхождений в среднемесячной скорости ветра, рассчитанной по 8 или по 16 румбам, в специализированной литературе отсутствует. В настоящей работе скорости ветра за 1971–1977 гг. рассчитаны по данным Метеорологических ежемесячников, где повторяемость и средние скорости ветра опубликованы по 16-ти румбам.

Для расчета испарения с водной поверхности озера Ханка за период с 1949 по 2015 годы использованы откорректированные с учетом возможных нарушений однородности данные наблюдений за скоростью ветра.

Величина испарения с оз. Ханка за месяцы с положительной среднемесячной температурой воздуха определялась по формуле из [6]:

$$E = 0.14 n (e_0 - e_{200}) (1 + 0.72 u_{200}), \quad (6.2)$$

где  $e_0$  – среднее значение максимальной упругости водяного пара, вычисленное по температуре воды в озере, мбар;  $e_{200}$  – среднее значение упругости водяного пара (абсолютной влажности) над водоемом на высоте 200 см, мбар;  $u_{200}$  – среднее значение скорости ветра над водоемом на высоте 200 см, м/с;  $n$  – число суток в расчетном интервале времени.

Выбор данной формулы для расчета испарения продиктован несколькими причинами:

- во-первых, она рекомендована в качестве основной расчетной формулы для определения испарения с водоемов, расположенных на равнинной территории, действующими руководящими документами [52],[61] и имеет наименьшую среднеквадратическую ошибку расчета 12,5 % [62];

- во-вторых, формула дает возможность выполнения расчетов за каждый конкретный месяц, используя материалы стандартных метеорологических и гидрологических наблюдений на сети Росгидромета;

- в-третьих, формула ранее использовалась в расчетах испарения с оз. Ханка в работе М. Г. Васильковского [2], что позволяет выполнить сравнительный анализ результатов расчета испарения.



- в-четвертых, многочисленные проверочные расчеты испарения, выполненные с использованием выбранной формулы и других полуэмпирических формул для 35 испарительных бассейнов, показали, что принятая для расчетов формула имеет наименьшую среднеквадратическую ошибку расчета, равную 12,5 % [62].

Для определения испарения за холодный период года с отрицательными среднемесячными температурами воздуха принята формула из Рекомендаций [63]:

$$E = (0.18 + 0.10u_{1000})(e_0 - e_{200}), \quad (6.3)$$

где  $u_{1000}$  – среднемесячная скорость ветра на высоте флюгера, м/с;  $e_0$  – максимальная упругость водяного пара, определенная по температуре поверхности снега, мб;  $e_{200}$  – упругость водяного пара, мб, на высоте 200 см.

Эта формула выведена и обоснована П.П.Кузьминым на основании использования материалов наблюдений за испарением со снежного покрова по 25 сетевым наблюдательным станциям (1229 измеренных суточных величин испарения). Формула рекомендуется для расчета испарения за периоды, продолжительностью не более одного месяца [64]. Ее надежность была подтверждена М. И. Ивероновой на основе собранного обширного материала, в том числе и для горных территорий [65].

Сроки холодного периода приняты с даты начала ледостава на озере до даты его окончания и расчет величины испарения проводился для каждого месяца холодного периода.

Однако, используемые в *формуле 6.3* эмпирические коэффициенты были определены в целом для всей территории Советского Союза. В ряде научных работ использованы другие «региональные» коэффициенты. При этом уточнения касаются в основном коэффициента, учитывающего влияние скорости ветра, что объясняется различиями ветрового режима в разных частях России. Известно, что средняя годовая скорость ветра над территорией России изменяется от 2 м/с и менее во внутриконтинентальных районах Азиатской части России и до 9 м/с над акваторией Охотского моря. Основной особенностью распределения средней годовой скорости ветра являются весьма значительные ее горизонтальные градиенты вблизи побережий северных морей и особенно значительные — вблизи побережий дальневосточных морей, где скорость ветра резко изменяется от 3 м/с на континенте и до 9 м/с над прибрежной акваторией морей.

Особенности ветрового режима на Дальнем Востоке обусловили необходимость корректировки эмпирического коэффициента ветрового компонента в *формуле 6.2* при региональной оценке величины испарения с поверхности снежного покрова озера Ханка.

Обобщение материалов наблюдений, выполненное специалистами ГГИ в 1981 году [66], позволило уточнить коэффициент, учитывающий скорость ветра, для некоторых районов Сибири и Приморья. Величина ветрового коэффициента для

разных районов приведена в *таблице 6.10*. На основании этих оценок при расчетах величины испарения с поверхности снега оз. Ханка была использована *формула 6.4* с региональным ветровым коэффициентом 0,15:

$$E = (0.18 + 0.15u_{1000})(e_0 - e_{200}). \quad (6.4)$$

*Таблица 6.10*

Числовые значения регионального ветрового параметра из [21]

Станция	Коэффициент, учитывающий скорость ветра
Омск	0,16
Тара	0,10
Тулун	0,27
Хомутово	0,15
Покровск	0,08
Хабаровск	0,14
Среднее	0,15

Формулы, принятые для расчета испарения за теплый и холодный периоды года, имеют одну важную особенность – результаты расчетов по ним существенно зависят от точности определения скорости ветра. Согласно результатам исследования М. П. Тимофеева [53] (*таблица 6.11*) увеличение скорости ветра с 1 до 10 м/с приводит к росту расчетной величины испарения в 10 раз.

*Таблица 6.11*

Изменения расчетных величин испарения при изменениях ряда метеоэлементов и морфометрических показателей водоема [53]

Характеристика	Пределы изменения (от-до)	Изменение испарения
Скорость ветра	1 – 10 м/с	Увеличение в 10 раз
Дефицит влажности	1 – 10 мб	Увеличение в 2,5 раза
Шероховатость водной поверхности	$1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$ м	Увеличение в 1,8 раза
Температура воздуха	5 – 40°	Увеличение в 2 раза
Размеры водоема	1 – 100 км	Уменьшение на 40 %
Глубина водоема	5 – 20 м	Уменьшение на 30 %
Альбедо воды	5 – 20%	Уменьшение на 5 %

В соответствии с «Указаниями по расчету испарения...» [52] расчет скорости ветра и абсолютной влажности воздуха при отсутствии наблюдений на акватории водоема выполняется по данным наблюдений на береговых метеостанциях.

Для оз. Ханка такие расчеты выполнены по данным метеостанций Астраханка, Турий Рог и Новосельское с последующим определением средневзвешенных значений указанных метеозаэментов для всего водоема с учетом доли каждого из трех участков акватории озера, тяготеющих к соответствующей метеостанции. Разделение акватории озера на участки с учетом повторяемости направлений и скоростей ветра над озером в различные месяцы (*таблица 6.12*) принято по данным М. Г. Васьковского [1]. Это же разделение использовано и для расчета характеристик влажности воздуха на акватории озера.

Абсолютная влажность воздуха над водоемом рассчитана по формуле:

$$e_{200} = e'_{200} (0,8 e_0 - e'_{200}) M, \quad (6.5)$$

где  $e'_{200}$  – средняя влажность воздуха, измеренная на прибрежной метеостанции, мб;  $e_0$  – среднее значение максимальной упругости водяного пара, вычисленное по температуре воды в озере, мб;  $M$  – коэффициент трансформации, учитывающий среднее изменение влажности и температуры воздуха в зависимости от размера водоема.

*Таблица 6.12*

Разделение акватории озера Ханка на участки (в % общей площади), прилегающие к метеорологическим станциям (средние значения) в соответствии с [1]

Метеостанция	М е с я ц ы							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Новосельское	26	26	24	23	25	27	27	27
Астраханка	40	41	45	45	42	39	38	37
Турий Рог	34	33	31	32	33	34	35	36

Максимальная упругость водяного пара определена по среднемесячной температуре поверхности воды водоема. Для оз. Ханка осредненные по акватории, данные имеются за периоды с 1961 по 2005 гг. и с 2010 по 2014 гг. В то же время для гидрологического поста Астраханка имеются непрерывные ряды наблюдений за весь расчетный период с 1949 по 2015 гг. Корреляционный анализ рядов, соответствующих данным за совместные периоды наблюдений показал, что в с июня по октябрь (когда наблюдается самое интенсивное испарение) среднемесячные значения температуры воды по акватории и по посту Астраханка отличаются не более чем на 1°C. Коэффициенты корреляции между двумя выборками за указанные летние месяцы оказались достаточно высокими и равным 0.80–0,90. В переходные месяцы (апрель, май) значения среднемесячной температуры воды на посту Астраханка и средней по акватории различались также в пределах 1°C, а коэффициенты корреляции рядов оказались несколько ниже, чем для летних месяцев, но все же достаточно высокими (0,7–0,8). Таким образом, для оценки максимальной упругости водяного

пара использованы данные о среднемесячной температуре поверхности воды, полученные по наблюдениям на озерном гидрологическом посту Астраханка. Высокая репрезентативность данных наблюдений за температурой воды на посту Астраханка и их близкое соответствие оценкам, выполненным для всей акватории озера, была отмечена еще М. Г. Васьковским [1].

В холодные месяцы (со средней температурой воздуха и почвы ниже нуля градусов (ноябрь–март) максимальная упругость водяного пара определена по температуре поверхности снега на метеостанции Астраханка.

Значения коэффициента трансформации  $M$  приняты согласно [1] в зависимости от длины разгона воздушного потока над водной поверхностью: 0,40 для метеостанции Астраханка, 0,43 для метеостанции Турий Рог и 0,40 для метеостанции Новосельское. Рассчитанные по формуле 6.5 по данным трех метеостанций значения влажности воздуха над водоемом осреднялись для всего озера с учетом процентного соотношения прилегающих к ним площадей акватории.

Достоверность полученных расчетных значений средней температуры поверхности воды по озеру за период май – октябрь подтверждается синхронностью изменений характеристик, рассчитанных для озера и полученной по наблюдениям на водноиспарительной площадке МС Астраханка по испарителю ГГИ-3000 и испарительному бассейну  $20 \text{ м}^2$  (рисунок 6.10).

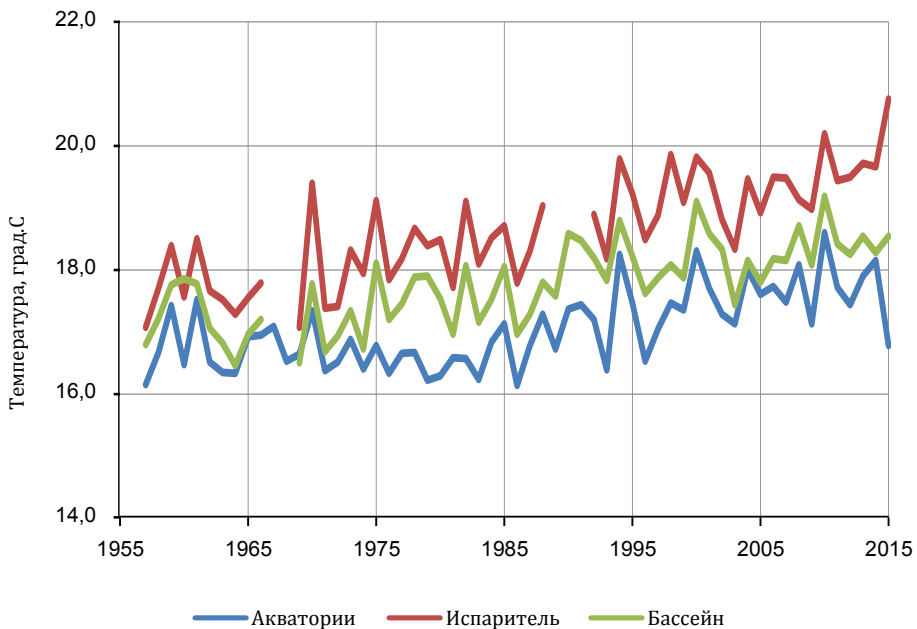


Рисунок 6.10 – Хронологические графики хода среднемесячной температуры поверхности воды, рассчитанной для озера и полученной по данным наблюдений в испарителе ГГИ-3000 и испарительном бассейне  $20 \text{ м}^2$  за период май–октябрь

Отметим, что средние годовые значения температуры испаряющей поверхности (вода, лед и снег) за период 1949–2015 гг. увеличились на 1,7 °С. При этом скорость роста температуры со второй половины 1980-х годов превышает скорость ее изменения в предшествующий период.

Рассчитанные для акватории озера значения температуры поверхности воды и снега использованы для расчета максимальной упругости водяного пара над поверхностью озера и дефицит влажности как разность между максимально возможной и фактической упругостью водяного пара при данной температуре. За рассматриваемый период (1949–2015 гг.) наблюдается рост величины годового дефицита влажности воздуха. С 1949 по 2015 гг. величина дефицита влажности выросла на 0,8 мб. При этом с 1981 г. отмечается ее устойчивый рост. В течение последних 18 лет (1998–2015 гг.) рост годового дефицита составил 0,4 мб при максимальной интенсивности изменений.

Для определения среднемесячных скоростей ветра над акваторией озера в качестве базовой была принята метеорологическая станция Астраханка, для которой имеются наиболее полные данные наблюдений за ветром. Кроме того, эта метеостанция находится почти на берегу озера и хорошо открыта ветрам практически всех направлений. На метеостанциях Турий Рог и Новосельское в опубликованных материалах наблюдений за ветром имеются большие пропуски.

Для каждой из трех станций были рассчитаны скорости ветра на высоте 2 м -  $u_{200}$  в соответствии с [35] по формуле:

$$u_{200} = K_1 K_2 K_3 U_{\phi}, \quad (6.6)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий степень защищенности метеостанции;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий характер рельефа в пункте наблюдений;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий среднюю длину разгона воздушного потока над водоемом;  $u_{\phi}$  – скорость ветра на высоте флюгера за расчетный интервал времени, м/с.

Среднемесячные значения скорости ветра на метеостанциях рассчитаны с учетом повторяемости ветра по 8 румбам (с 1970 по 1977 гг. по 16 румбам) и повторяемости штилей.

Величина коэффициента защищенности принята в соответствии с рекомендациями М. Г. Васьковского [1], выполнившего анализ большого массива материалов наблюдений за ветром на метеостанциях и на акватории во время выполнения гидрологических разрезов и вертикалей.

Сводные значения коэффициентов, принятые для метеостанций, приведены в *таблице 6.13*. Среднемесячные скорости ветра над водоемом рассчитаны по данным трех метеостанций за периоды синхронных наблюдений и затем осреднены для всей акватории озера с учетом «весов» прилегающих к ним площадей участков озера.

По полученным данным за эти же периоды были построены графики связи среднемесячных значений скоростей ветра на метеостанции Астраханка и над акваторией озера.

Таблица 6.13

Значения поправочных коэффициентов, учитывающих защищенность ( $K_1$ ), характер рельефа ( $K_2$ ) и длину разгона воздушного потока над акваторией ( $K_3$ )

Метеостанция	Коэффициенты		
	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Астраханка	1,1	1,0	1,0
Турий Рог	1,0	1,0	1,0
Новосельское	2,0	1,0	1,0

Оказалось, что коэффициент корреляции двух рядов колеблется в диапазоне 0,7–0,9. При этом для месяцев теплого периода (май–август), когда наблюдаются более сильные ветры, а испарение существенно возрастает, коэффициенты корреляции приближаются к 0,90. Коэффициенты корреляции менее 0,80 соответствуют месяцам холодного периода. Однако, с учетом того факта, что в зимний период наблюдаются более низкие средние скорости ветра и малые величины испарения, погрешности определения скорости ветра в эти месяцы не повлияли существенно на расчетные величины годового испарения. Выявленные зависимости были использованы для получения данных о скоростях ветра над акваторией озера за месяцы, когда отсутствовали данные наблюдений за ветром хотя бы по одной из метеостанций.

Подтверждением правомерности принятого способа оценки средней по акватории скорости ветра служит достаточно хорошее совпадение ее изменений с данными наблюдений на водноиспарительной площадке озерной станции Астраханка, выполненные на высоте 2 м с помощью анемометра. На *рисунке 6.11* приведены изменения рассчитанной для акватории озера и наблюдаемой на берегу скорости ветра для теплого периода года (май–октябрь).

Среднегодовая величина скорости ветра на акватории озера за период 1949–2015 гг. уменьшилась более чем на 1,0 м/с. Начиная с конца 1980-х годов интенсивность падения скорости ветра максимальна (0,7 м/с за 29 лет).

Полученные для акватории озера Ханка ряды метеорологических параметров использованы для расчета месячных величин испарения с 1949 по 2015 гг.

Проверка достоверности полученных расчетных значений испарения с акватории оз. Ханка проведена путем их сопоставления с данными натурных наблюдений за испарением с водной поверхности по испарительному бассейну 20 м и испарителю ГГИ–3000 на МС Астраханка и испарителю аналогичной конструкции

на МС Турий Рог. Для этого данные наблюдений были приведены к единому расчетному периоду май–октябрь, с использованием методики, предложенной В. С. Голубевым [67] [68].

При наличии данных наблюдений за неполный месяц расчет месячной величины испарения произведен по формуле:

$$E = a_E \times d, \quad (6.7)$$

где  $a_E$  – калибровочный коэффициент,  $d$  – среднемесячная величина дефицита влажности воздуха, мб.

Для первого и последнего месяца расчетного периода величина калибровочного коэффициента определена как отношение величины испарения за все сутки с наблюдениями ( $\Sigma E_c$ , мм) к средней величине дефицита влажности воздуха за этот же период ( $d_c$ , мбар):

$$a_E = \Sigma E_c / d_c. \quad (6.8)$$

Если данные наблюдений за испарением отсутствовали в середине анализируемого периода, калибровочный коэффициент  $a_E$  оценивался по следующему уравнению:

$$a_E = (\Sigma E_{m-1} + \Sigma E_c + \Sigma E_{m+1}) / (d_{m-1} + d_c + d_{m+1}), \quad (6.9)$$

где  $\Sigma E_c$ , мм и  $d_c$ , мб – то же, что и в уравнении (6),  $\Sigma E_{m-1}$ ,  $\Sigma E_{m+1}$  суммы испарения за предыдущий (m-1) и последующий (m+1) месяцы, мм;  $d_{m-1}$ ,  $d_{m+1}$  – среднемесячные величины дефицита влажности воздуха за предыдущий (m-1) и последующий (m+1) месяцы, мб.

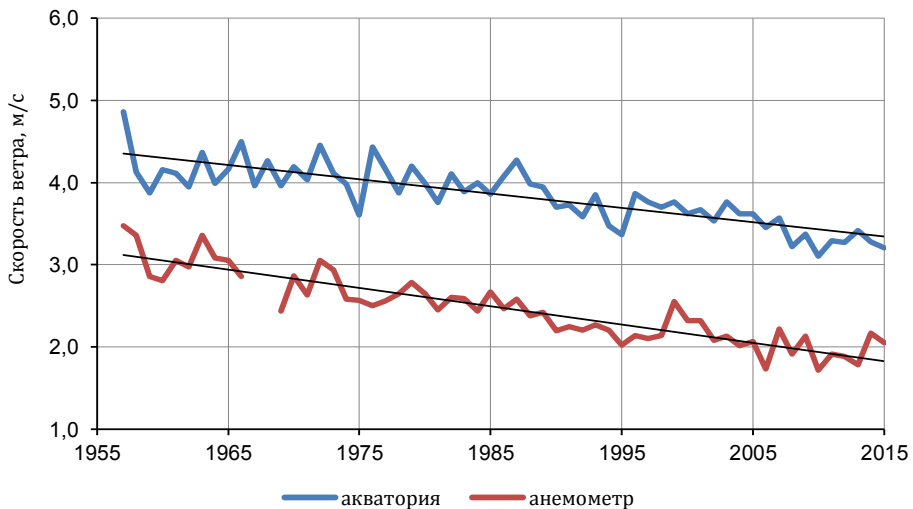


Рисунок 6.11 – Хронологические графики изменений скоростей ветра за период май–октябрь, рассчитанных для акватории оз. Ханка и полученных по данным наблюдений на водноиспарительной площадке озерной станции Астраханка

Среднемесячные значения дефицита влажности воздуха получены путем осреднения среднесуточных значений.

Указанный методический подход позволил заполнить пропуски в месячных значениях наблюдаемого испарения и получить его корректные суммы за теплый период (май–октябрь) для всех испарительных приборов на двух станциях.

Результаты сопоставления величины испарения за теплый период, полученной расчетным путем для водной поверхности озера и по наблюдениям за испарением по испарительному бассейну 20 м<sup>2</sup> и двум испарителям ГГИ-3000, показали синхронность их изменений, что подтверждает достоверность полученного ряда расчетных значений испарения для водной поверхности озера (*рисунок 6.12*).

Обращает на себя внимание синхронность многолетних колебаний трех сопоставляемых рядов испарения и практически одинаковый характер трендов – они отрицательные и достаточно значимые. Разница абсолютных величин испарения корректно отражает особенности измерения испарения испарительными приборами, а именно завышение выличин испарения по сравнению с естественным испарением за счет ограниченной площади водной поверхности испарительного прибора. При этом испаритель ГГИ-3000 дает более высокие значения испарения по сравнению с испарительным бассейном 20 м<sup>2</sup> в силу меньшей площади водной поверхности.

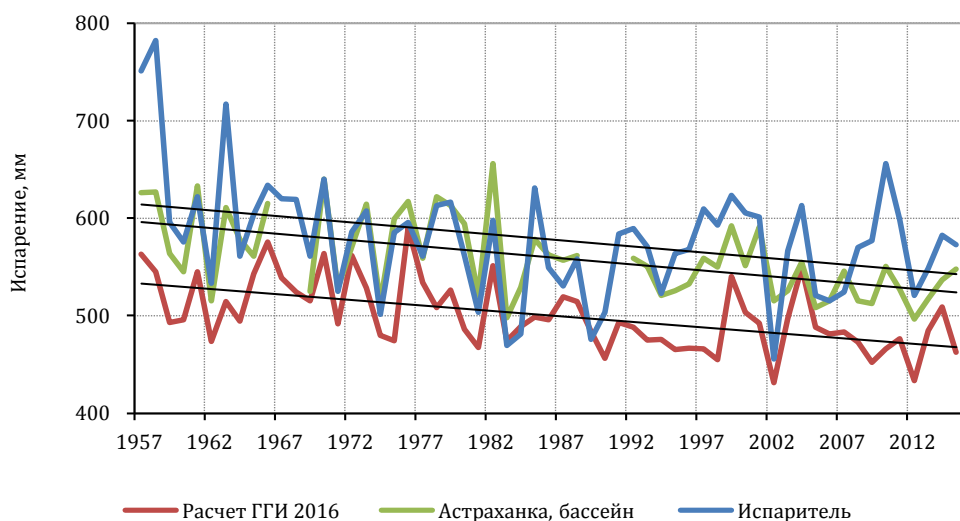


Рисунок 6.12 – Хронологические графики хода испарения, рассчитанного для акватории озера и полученного в результате наблюдений по двум испарительным приборам на метеостанции

На *рисунке 6.13* представлен хронологический график годовых сумм испарения с водной поверхности оз. Ханка, на *рисунке 6.14* – разностная интегральная кривая за период 1949–2015 гг.



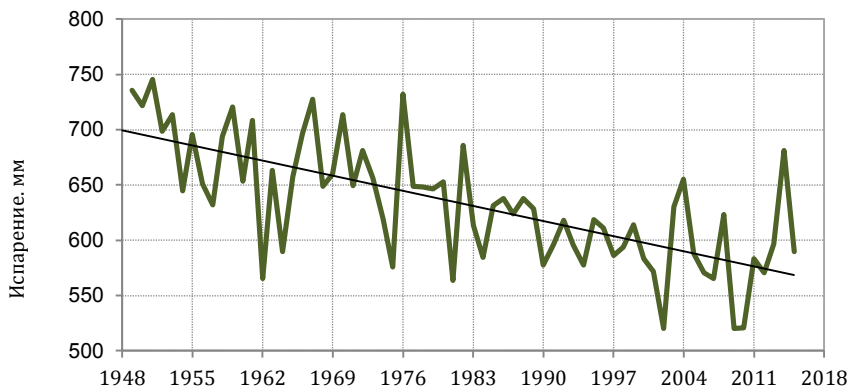


Рисунок 6.13 – Хронологический график хода испарения с водной поверхности оз. Ханка

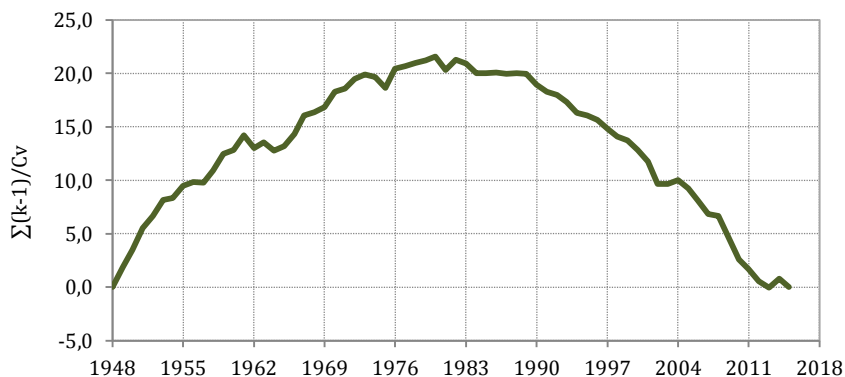


Рисунок 6.14 – Разностная интегральная кривая годовых сумм испарения с водной поверхности оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

Тренд годового испарения с поверхности оз. Ханка (рисунок 6.13) за исследуемый период (1949–2015 гг.) составил 147 мм. При этом весь период можно разделить на две фазы: достаточно интенсивное падение величины испарения (-2,0 мм/год) с 1949 по 1980 гг. и менее заметное изменение его величины (-1,2 мм/год) с 1981 г.

Оценка линейного тренда изменения годового испарения за выделенные периоды составляет:

- 1949–1980 гг. – достаточно интенсивное падение величины испарения (-2,0 мм/год) со средним значением годового испарения 708 мм;
- 1981–2015 гг. – менее заметное изменение его величины (-1,2 мм/год) со средним значением годового испарения 627 мм.

При этом для всего периода с 1949 по 2015 гг. значимость отрицательного тренда величины испарения с поверхности оз. Ханка превышает 95 %-ный уровень (таблица 6.14).

Оценка линейного тренда в изменении испарения с поверхности оз. Ханка за период с 1949 по 2015 гг.

Среднее значение, мм	Среднее квадратическое отклонение, $\sigma$ ,	Коэффициент линейного тренда, $\beta$	Дисперсия ошибки, $\sigma_\beta$	Тренд в % от среднего	Значимость тренда
666	60,6	-2,198	0,382	-22	значим

Следует также отметить, что с 1949 по 1980 гг. изменение годовой величины испарения определялось тенденцией изменения его величины за теплый период с открытой водной поверхности: величина снижения годового испарения составила 63 мм и почти 65 мм за теплый период.

В течение второй половины периода (1981–2015 гг.) величина изменений годового испарения составила 42 мм, а за теплый период – 22 мм. Уменьшение вклада испарения за теплый период в его годовую величину объясняется, по-видимому, существенным уменьшением скорости ветра в летний период [57], несмотря на рост продолжительности периода открытой водной поверхности вследствие роста температуры воздуха [69] [70].

Падение величины испарения на фоне роста температуры воздуха и осадков хорошо укладывается в феномен так называемого «парадокса испарения» [70]. Величина испарения с водной поверхности в процессе глобального потепления практически во всех регионах Земного шара уменьшается вопреки ожидаемого ее увеличения.

Вместе с тем, следует обратить внимание на наметившуюся в 2000-х гг. тенденцию увеличения годового испарения (рисунок 6.13). Аналогичные тенденции изменения испарения с начала 2000-х гг. прослеживаются и в других регионах России [71] [72]. Это может свидетельствовать о формировании новой тенденции изменения испарения с водной поверхности в последнее десятилетие.

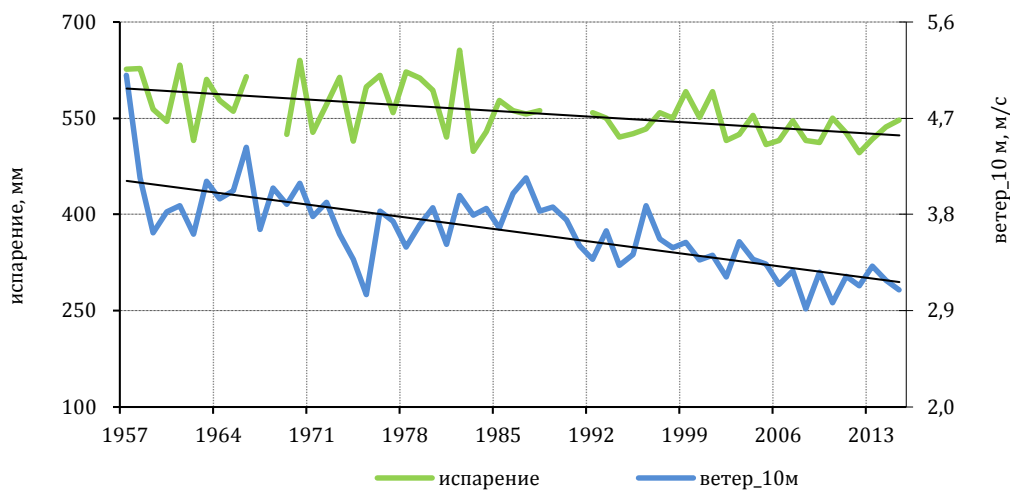
Для выявления основных метеорологических процессов, определяющих тенденцию изменения испарения, оценены связи его величины с различными метеорологическими переменным, в частности, с дефицитом влажности воздуха и скоростью ветра на акватории оз. Ханка.

Анализ зависимости изменения величины испарения от метеорологических факторов проводился на основе результатов стандартных наблюдений за дефицитом влажности воздуха, скорости ветра на высоте 2 м и температурой воды в испарительном бассейне площадью 20 м<sup>2</sup> на метеостанции Астраханка. Ряд наблюдений составил 59 лет, с 1957 по 2015 гг.

Анализ многолетних хронологических рядов указанных факторов и испарения с бассейна показал, что на фоне общей тенденции роста дефицита влажности воздуха

и температуры поверхности воды в бассейне и уменьшения скорости ветра, отмечается однонаправленная тенденция уменьшения величины испарения (рисунк 6.15).

Из трех рассмотренных факторов определяющее влияние на процесс испарения оказывает скорость ветра. Это подтверждают данные таблицы 6.15, из которой видно, что вклад трендовой составляющей скорости ветра наибольший среди других рассмотренных факторов. Подтверждением существенного влияния скорости ветра на величину испарения служит график связи этих элементов, построенный по данным совместных наблюдений за 59 лет (рисунк 6.16). Коэффициент корреляции этой зависимости оказался равным 0,64.



Рисунк 6.15 – Совмещенный график изменения испарения по данным наблюдений в бассейне 20 м<sup>2</sup> и средней скорости ветра за май-октябрь на высоте флюгера на метеостанции Астраханка

Таблица 6.1512

Величина линейного тренда за период (1949–2015 гг.) для испарения и основных метеорологических характеристик за теплый сезон (май–октябрь)

Переменные	Величина тренда в месяц и за сезон						
	5	6	7	8	9	10	сезон
Испарение, мм/год	-0,389	-0,231	-0,217	-0,369	-0,213	-0,063	-1,483
Испарение, % за период 1949–2015 гг.	-31,2	-17,8	-15,8	-24,6	-17,0	-6,8	-19,6
Скорость ветра, м/с/год	-0,022	-0,021	-0,021	-0,019	-0,019	-0,011	-0,019
Скорость ветра, % за период 1949–2015 гг.	-31,0	-34,6	-37,8	-37,2	-35,8	-18,8	-32,2
Деф. влажности, мб/год	-0,003	0,006	0,010	0,003	0,009	0,001	0,004
Деф. влажности, % за период 1949–2015 гг.	-5,2	8,2	11,6	2,8	10,8	2,4	5,6

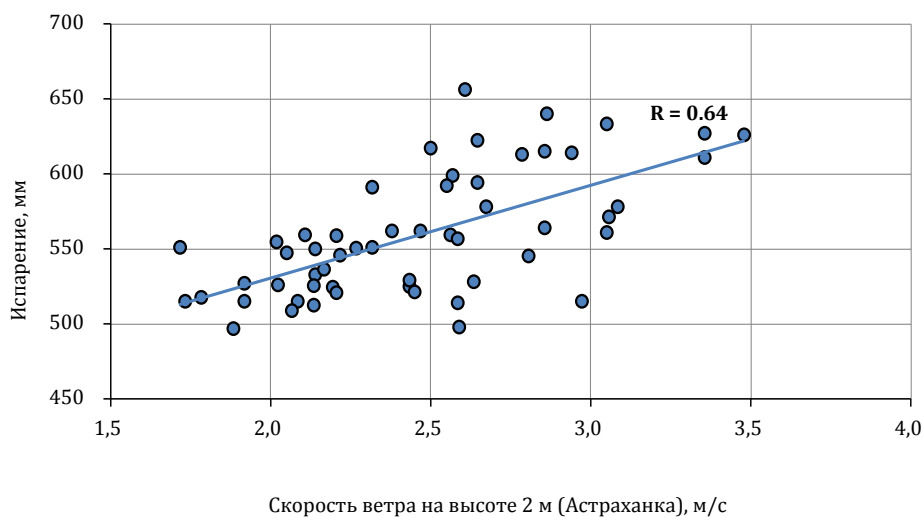


Рисунок 6.16 – График зависимости величины испарения с бассейна 20 м<sup>2</sup> от средней скорости ветра за период май–октябрь

На рисунке 6.17 представлены хронологические графики многолетней динамики испарения, скорости ветра, дефицита влажности и температуры воды за теплый период 1957–2015 гг.

Анализ коэффициента детерминации показал, что изменение скорости ветра объясняет более 50 % дисперсии величины испарения с акватории озера. Дефицит влажности воздуха определяет чуть более 20 % дисперсии годового испарения. Совместное влияние этих факторов объясняют более 70 % дисперсии величины испарения.

Полученный вывод соответствует известным закономерностям, приведенным в монографии М. П. Тимофеева [53]: рост дефицита влажности воздуха в диапазоне 1–10 мб приводит к росту величины испарения в 2,5 раза, а рост скорости ветра в таком же диапазоне приводит к увеличению испарения в 10 раз.

Несмотря на относительно невысокий коэффициент корреляции (0,64) величины испарения и скорости ветра за теплый период (май–октябрь), анализ месячных параметров линейных трендов для этого периода дает наглядное представление о вкладе ветра в процесс испарения (таблица 6.15).

Таким образом, снижение величины испарения в основном определяется заметным уменьшением скорости ветра. Рост величины дефицита влажности воздуха оказывает меньшее влияние на изменение величины испарения. Только в мае месяце уменьшение дефицита влажности вносит некоторый вклад в величину падения испарения.



Рисунок 6.17 – Многолетние изменения испарения, скорости ветра, дефицита влажности и температуры воды по данным наблюдений на водноиспарительной площадке Астраханка за теплый период 1957–2015 гг.

Сравнение полученных оценок с результатами М. Г. Васьковского [1] показало довольно хорошее совпадение тенденции изменений до начала 1960-х годов. При этом средняя годовая величина испарения из [1] почти на 100 мм (124 мм) меньше, чем полученная в настоящей работе. Различия объясняются корректировкой в данной работе исходной информации о скорости ветра до 1966 г. и уточнением формулы (2) для расчета испарения в зимний период.

Как показано выше, исходный ряд сумм испарения с водной поверхности является неоднородным. В связи с этим, при неоднородности ряда использована составная кривая распределения вероятностей (рисунок 6.18). В таблице 6.16 приведены статистические характеристики испарения с водной поверхности оз. Ханка.

Таблица 6.136

Статистические характеристики и расчетные значения суммарного годового испарения с водной поверхности оз. Ханка за периоды 1949–1980, 1981–2015 гг.

Расчетный период	$E_{cp}$	$C_v$	$C_s$	$R(1)$	Обеспеченности, %								
					1	5	10	25	50	75	90	95	99
1949-1980	670	0,07	0	0,13	777	746	729	701	670	639	612	595	564
1981-2015	599	0,06	0	0,21	689	663	649	625	599	573	549	535	509
1949-2015	633	0,09	0,11	0,52	754	726	708	674	630	592	563	547	517

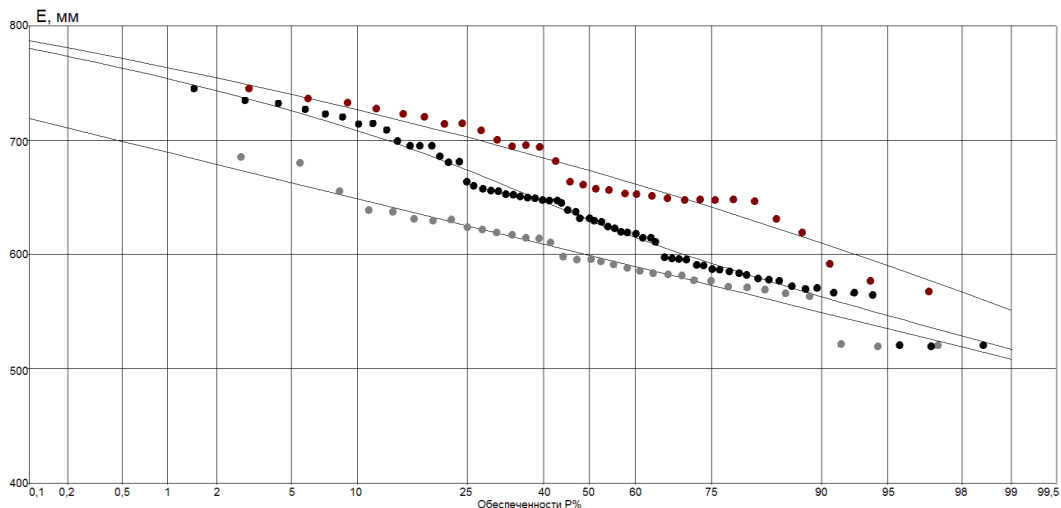


Рисунок 6.18 – Составная кривая распределения испарения с поверхности озера за период 1949–2015 гг.

## 6.5 Уровень воды

Регулярные наблюдения за уровнем воды были начаты в 1912 г. Амурским водным управлением в истоке р. Сунгач у с. Новомихайловская; наблюдения продолжались до 1919 г, после чего неоднократно возобновлялись. С 1913 по 1919 гг. на оз. Ханка у с. Камень-Рыболов выполнялись наблюдения за уровнем воды Окружным земельным управлением. В 1923 г. были начаты наблюдения за уровнем у с. Астраханка; наблюдения были прерваны в 1934 г. и возобновлены в 1936 г.,

но нули графика не были увязаны; наблюдения на этом посту продолжаются по настоящее время. Позже были открыты посты у с. Турий Рог в 1944 г. (действующий) и у Сопки Лузанова в 1954 г. (закрыт в 1976 г.).

Материалы наблюдений за уровнем отличаются по качеству. По обоснованному мнению М. Г. Васьковского надежными являются результаты наблюдений только начиная с 1958 г. В 1957 г. была произведена привязка реперов водомерных постов к государственной опорной сети, были получены отметки нулей графиков постов в Балтийской системе высот. Однако нивелировка IV класса не обеспечила надежной передачи высотных отметок в условиях пересеченной местности. Поэтому в Приморском УГМС была выполнена увязка водомерных постов методом водной нивелировки. Был выполнен детальный анализ; выбраны периоды наблюдений в зимние периоды, когда скорость ветра была незначительна. Для этих периодов были определены средние отклонения между показаниями отдельных постов. С 1 января 1965 г. за нуль графика постов на оз. Ханка была принята плоскость с отметкой 66,00 м БС. В монографии приведены поправки к данным наблюдений для различных периодов и постов. В 1990 г. нивелировкой IV класса была произведена привязка уровнемерных устройств озерных постов к сети госнивелирования в Балтийской системе 1977 г.

Известно [73], что на ход уровня на озере существенно влияют ветровые денивелиации. В соответствии с методическими рекомендациями [74] средний уровень озера можно определять, как средневзвешенный с учетом площадей, тяготеющих к каждому из водомерных постов, или по данным тех постов, которые расположены на осях равновесия, соответствующим ветрам различного направления. Для озер все оси равновесия пересекаются вблизи центра тяжести. Посты, данными по которым располагал М. Г. Васьковский, расположены на западном (Астраханка и Турий Рог) и южном берегах (Сопка Лузанова) *рисунок 6.4*. Расположение постов не позволило автору надежно выделить участки акватории озера, тяготеющие к каждому посту. Посты на озере расположены несимметрично относительно осей равновесия, на основании чего автор делает вывод о том, что их показания непосредственно не характеризуют средний уровень оз. Ханка. Проанализировав совмещенные хронологические графики колебания уровня воды на всех постах, автор получил, что при скоростях ветра над акваторией озера до 3–4 м/с значения уровня практически совпадают для всех постов, на основании чего был сделан вывод, что в такие периоды они характеризуют средний уровень озера. На этих графиках имеются точки пересечения уровней на различных постах, что происходит обычно через 4–5 дней. Линия, соединяющая эти точки, по справедливому мнению автора, характеризует положение среднего уровня воды в озере.

М. Г. Васьковский подробнейшим образом исследовал влияние ветровых денивелиаций на показания уровнемерных постов на оз. Ханка и исключил это влияние для расчета среднемесячных и, соответственно, среднегодовых значений уровней.

Автор получил значения повторяемости ветровых денивеляций уровня, оценил наиболее значительные ветровые денивеляции уровня за период 1946–1973 гг. Наибольший нагон воды составил 160 см, наибольший сгон – 100 см, исследовал также внутригодовую изменчивость денивеляции. Анализируя отдельные составляющие водного баланса за сентябрь–декабрь 1958 г., автор определил, что увеличение стока за эти месяцы не подтверждается данными наблюдений за уровнем воды на р. Сунгач. Тщательный анализ совмещенного графика уровня воды по трем постам показал, что было шесть случаев одновременного сгона воды. Соответственно у восточного берега, очевидно, наблюдался большой нагон, в результате которого существенный объем воды мог перелиться через бровку и поступить на низменную заболоченную прилегающую территорию. После прекращения нагона этот объем не возвратился в озеро. Экспедиционные исследования 1967 г. показали, что высота нагона составляла 0,8 м. Таким образом, было подтверждено существенное влияние сгонно-нагонных денивеляций на составляющие водного баланса озера. М. Г. Васьковским подробно проанализировано внутригодовое изменение уровня воды озера. Годовая амплитуда колебаний уровня в среднем составляет 0,9–1,5 м, причем максимум равняется 2,1 м. Исключив ветровые денивеляции, автор получил значения годовой амплитуды в пределах 0,5–0,8 м.

Также проанализированы зависимости годовых колебаний уровня воды от суммы осадков в бассейне озера. Сделаны обоснованные выводы о том, что при годовой сумме осадков 520–580 мм приходная и расходная составляющие водного баланса равны. Автором построены эмпирические кривые обеспеченности годовых изменений уровня воды на посту у с. Астраханка за 1912–1973 гг.; получено, что повторяемость лет с изменениями от 0 до 15 см составляет 30 %, а повторяемость лет с большими изменениями от 45 до 62 см не превышает 15 %. Проанализированы повторяемость стояния уровней озера и продолжительность их стояния за характерные годы и многолетний период. Анализ данных по положению уровня воды на 1 января за период с 1948 по 1971 гг. показал, что значения уровня изменялись от +58 см (1968 г.) до -53 см (1952 г.).

Была выполнена огромная работа по тщательному анализу имеющихся данных наблюдений; были приведены наблюдения на всех постах к общему нулю графика, восстановлены пропуски, исправлены ошибки. В результате получен непрерывный ряд наблюдений за уровнем за 1912–1973 гг. Также был выполнен анализ информации об уровнях за период с 1860-х годов, в результате автор определил, что за столетие наблюдалось четыре цикла колебаний уровня.

В статье [75] показана синхронность колебаний уровня воды с колебаниями водности рек, впадающих в озеро. Отмечено, что наиболее длительный спад уровня в озере (1866–1884 гг.) совпал с максимумом солнечной активности 1874 г., а наиболее длительный подъем (1926–1946 гг.) с минимумом солнечной активности



(1935 г.). Однако, по мнению Васьковского, причиной цикличности колебания уровня воды в озере является ритмичность и интенсивность муссонной циркуляции, которая определяет увлажненность территории.

Среднегодовое значение уровня воды оз. Ханка, вычисленный М. Г. Васьковским за период 1912–1973 гг., равен 290 см над нулем графика водомерных постов. Им приведены максимальные значения среднегодовых уровней, которые наблюдались в 1915, 1939 и 1972 гг. (соответственно 356, 351 и 363 см). Максимальные срочные значения уровня воды на посту Астраханка, наблюдались в 1915, 1939, 1961 и 1973 гг. (соответственно 404, 403, 403 и 400 см), на других постах максимальные уровни в разные годы достигали значений 430 и 408 см. В работе приведены характерные уровни воды и даты их наступления, а также значения характерных уровней различной обеспеченности. Выполнено сравнение значений двухсрочных наблюдений с показаниями самописца уровня воды на посту Астраханка; сделан важный вывод о том, что разница может составлять 25–30 см для высшего уровня и 40–50 см для низшего. В результате более подробного анализа автор пришел к выводу, что «при расчетах высших годовых уровней без ветровой денивеляции можно в первом приближении пользоваться кривой обеспеченности наибольших среднемесячных уровней». Равнообеспеченные наивысшие годовые уровни воды по постам Астраханка и Турий Рог оказались равны между собой, что, по мнению Васьковского, свидетельствует о симметричном расположении этих постов по отношению к оси равновесия для преобладающих направлений ветров.

В справочнике [36] приведены данные об основных характеристиках и режиме оз. Ханка. Морфометрические характеристики определены относительно среднего многолетнего уровня воды, равного 290 см. Приведены средние месячные уровни, осредненные за многолетний период, по постам с. Астраханка (за 1936–1980 гг.) и с. Турий Рог (за 1944–1980 гг.), а также их наибольшие и наименьшие значения. Среднее многолетнее значение уровня за период наблюдений на посту Астраханка равно 292 см, на посту Турий Рог 298 см (отметка нуля постов равна 66,00 м БС). Также даны средние месячные, средние годовые и на 1-е число средние уровни озера в абсолютных отметках за период с 1946 по 1980 гг. Средний уровень озера определялся по данным действующих постов «осреднением за зимние и по средней линии колебания уровня воды за летние месяцы», причем колебания за счет сгонно-нагонных денивеляций были исключены. Таким образом, средний уровень озера с 1946 по 1980 гг. составил 68,92 м БС.

В справочнике приведены характерные уровни воды озера, даты их наступления и годовые колебания уровня. Значения характерных уровней выбраны по данным срочных наблюдений с использованием материалов самописцев или учащенных наблюдений. Годовые колебания уровня вычислены как разность высшего и низшего уровней за календарный год; среднее значение – осреднением колебаний

за все годы. Сгонно-нагонные колебания определены как разность максимального уровня при нагоне (минимального при сгоне) и среднего уровня в этот момент. Информация о скорости и направлении ветра получена по данным наблюдений на посту. Наивысший уровень на посту Астраханка с 1938 по 1980 гг. наблюдался 23.10.1974 г. и был равен 433 см, низший равен 136 см 17.06.1954 г. Средние колебания уровня за год равны 98 см, максимальные 203 см, минимальные 35 см. На посту Турий Рог наивысший уровень с 1946 по 1980 гг. наблюдался 17.10.1974 г. и был равен 438 см, низший равен 165 см 03.11.1980 г. Средние колебания уровня за год равны 98 см, максимальные 134 см, минимальные 47 см. Максимальный нагон на посту Астраханка наблюдался 14.09.1954 г. и был равен 147 см при скорости ветра 34 м/с СВ направления, максимальный сгон – 30.04.1946 г. и был равен 97 см при скорости ветра 20 м/с Ю направления. Максимальный нагон на посту Турий Рог был зафиксирован 07.05.1961 г. и был равен 105 см при скорости ветра 8 м/с Ю направления, максимальный сгон – 09.06.1954 г. и был равен 110 см при скорости ветра 16 м/с ССЗ направления.

В работе [76] приведен хронологический график натуральных данных по изменению уровня озера Ханка за 1912–1982 гг. К сожалению, нет ссылок, откуда взяты эти натурные данные. На основании нелинейной модели многолетних колебаний уровня оз. Ханка, автором выдвинута гипотеза о существовании трех равновесных уровней, два из которых устойчивые, а одно – неустойчивое. Этим В. И. Найденов объясняет возникновение маловодных и многоводных фаз в режиме озера.

Авторы исследования [20] отмечают превышение исторического максимума уровня озера в последнее время более, чем на 0,5 метра. Приводят значения максимальных уровней в 2015 г., которые незначительно отличаются от данных измерений Приморского УГМС. Обеспеченность среднегодового уровня озера в 2015 г., по мнению авторов, менее 1 %.

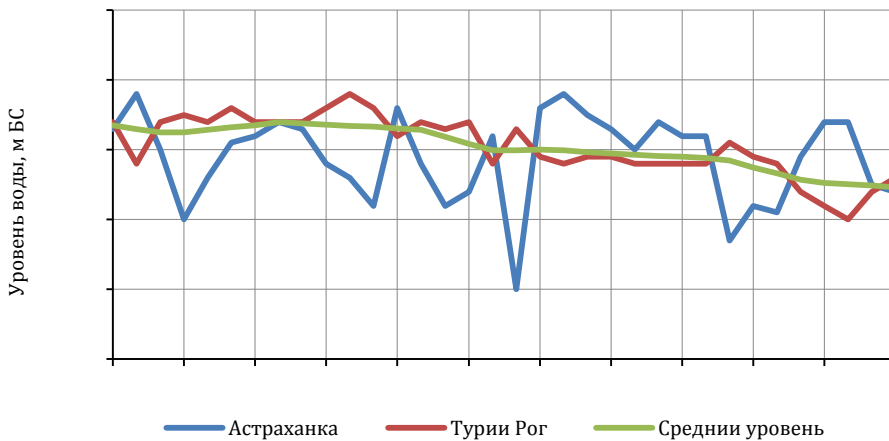
Для определения характеристик уровня озера, необходимых при составлении его водного баланса была собрана и проанализирована информация по уровню озера за весь период наблюдений, включая 2016 год.

Поскольку на оз. Ханка наблюдения производятся на двух постах, расположенных на западном берегу, а в период с 1954 по 1976 гг. действовал третий пост на южном берегу, то из-за неравномерного расположения постов невозможно корректно выделить площади акватории озера, тяготеющие к каждому из постов. Ни один из постов не находится вблизи осей равновесия, и данные наблюдений на посту не могут непосредственно характеризовать средний уровень воды озера. Поэтому при определении уровня воды озера, для исключения влияния сгонно-нагонных денивеляций, был использован следующий подход. Средний уровень озера определялся по данным действующих постов простым осреднением за зимние месяцы и по средней линии колебания уровня за летние месяцы [36]. В качестве

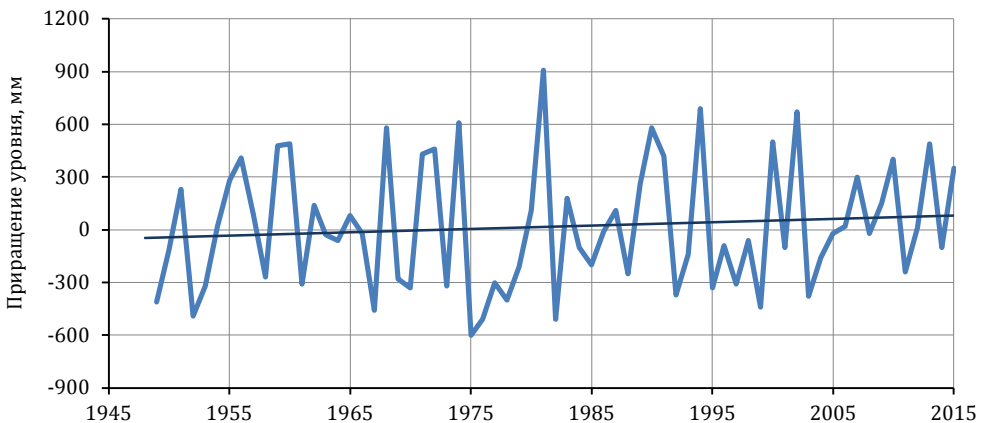
примера, на *рисунке 6.19* приведены графики изменения уровня воды на постах с. Астраханка и с. Турий Рог в июне–июле 1974 г. и средний уровень озера. Соответственно, уровень на 1-е число месяца определялся после исключения влияния ветровых сгонно-нагонных денивеляций.

В 1990 г. нивелировкой IV класса была произведена привязка уровнемерных устройств озерных постов к сети госнивелирования в Балтийской системе 1977 года. С 01.01.1993 года отметки нуля графика постов были приняты 65,61 м БС 77 вместо 66,00 м (БС), в связи с этим значения уровней воды были пересчитаны.

На *рисунке 6.20* представлен график годовых изменений уровня оз. Ханка за период 1949–2016 г.г., на *рисунке 6.21* – разностная интегральная кривая изменений уровня оз. Ханка за тот же период.



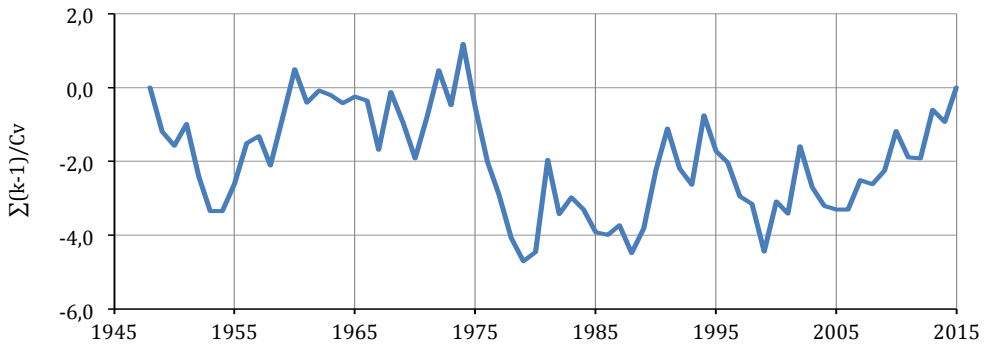
*Рисунок 6.19* – График колебаний уровня воды оз. Ханка в июне–июле 1974 г.



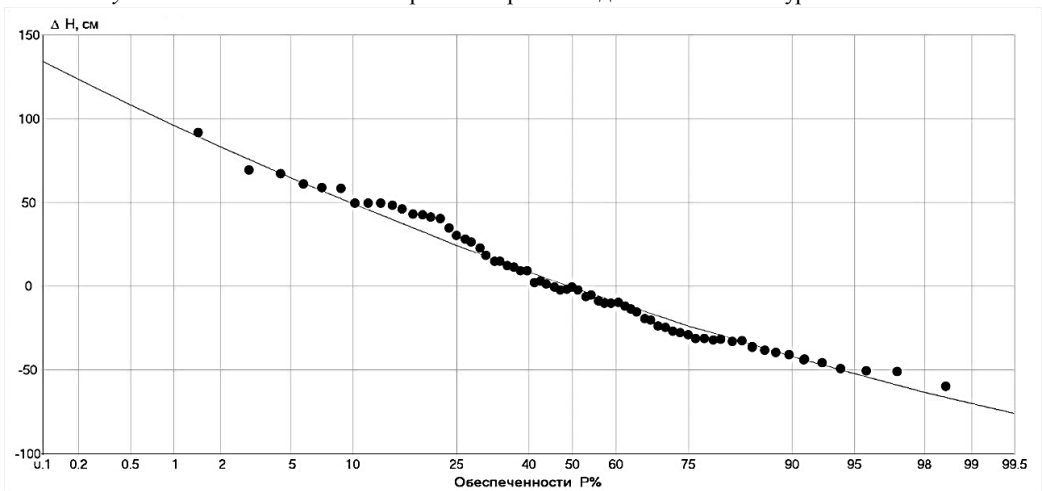
*Рисунок 6.20* – Годовые приращения уровня оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

Как следует из анализа графика на *рисунке 6.21*, в колебаниях годовых изменений уровня озера прослеживаются чередующиеся циклы. К выраженным тенденциям падения уровня можно отнести периоды: 1949–1953 гг., 1975–1979 гг., 1981–1988 гг., 1995–1999 гг. Общее падение уровня за указанные выше периоды составило, соответственно: -111 см, -202, -78 см, -125 см. Продолжительность фазы спада составляет, как правило, 5–7 лет. При этом устойчивая тенденция падения уровня наблюдается, как от высоких начальных ежегодных отметок уровня озера, так и от средних их значений. Общая продолжительная тенденция роста уровня озера на указанном выше графике прослеживается в периоды: 1954–1974 гг., 1989–1994 гг., и с 2006 по 2016 гг. Наиболее продолжительный период повышения уровня наблюдался в 1954–1974 гг. и с 2006 г. по настоящее время. Общий подъем за указанные выше периоды составил, соответственно: 199 см, 69 см, 136 см.

На *рисунке 6.22* представлена кривая распределения годовых изменений уровня оз. Ханка за период 1949–2015 гг.



*Рисунок 6.21* – Разностная интегральная кривая годовых изменений уровня оз. Ханка



*Рисунок 6.22* – Кривая распределения годовых изменений уровня оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

Обеспеченные значения годовых изменений уровня за период 1949–2015 гг.

Элемент водного баланса	Обеспеченности, %								
	1	5	10	25	50	75	90	95	99
Приращение уровня, см	96,0	64,7	49,1	24,2	-0,98	-23,8	-42,1	-52,4	-70,2

В *таблице 6.17* приведены годовые изменения (приращения) уровня различной обеспеченности за период 1949–2015 гг.

Выполненный анализ годовых изменений уровня оз. Ханка показал, что в их колебаниях прослеживаются чередующиеся циклы. За последний период повышения уровня, начавшийся с 2006 г. и продолжающийся по настоящее время, уровень повысился на 136 см. Выявлена значимая зависимость приращения уровня от сумм годовых осадков, выпадающих на одосборную площадь озера и отрицательная зависимость от испарения с поверхности озера. В 2016 г. был зафиксирован исторический максимум уровня озера, когда среднегодовой уровень достиг 69,96 см БС77.

## 6.6 Сток из озера по реке Сунгач

Поверхностный сток из озера через исток р. Сунгач является наименее изученным элементом водного баланса.

Обобщённые сведения по вопросу оценки стока из озера приведены в монографии Васьковского М. Г. [1]. Им установлено, что в периоды низкого стояния уровней воды в озере сток по р. Сунгач сокращался (среднегодовые расходы воды снижались до 35 м<sup>3</sup>/с), и существовавшее на реке судоходство становилось весьма затруднительным. В годы высокого стояния уровня воды в озере сток по реке увеличивался до 65 м<sup>3</sup>/с. Для осуществления судоходства в маловодные периоды систематически углублялся бар, что обеспечивало поддержку необходимых глубин судового хода в реке на протяжении навигационного периода. В маловодный период 1980-х гг. судоходство по реке было прекращено, в связи с чем прекратилось и углубление бара. По устным сообщениям сотрудников Ханкайского заповедника, он оказался занесён песком и стволами попавших в озеро деревьев. В результате, наступивший в начале 1990-х гг. период высокого стояния уровней в озере, не привел к увеличению водности р. Сунгач. Даже в сезон дождей в 2014 г. при высоком стоянии уровней в оз. Ханка расходы воды в реке не обеспечивали наполнения русла под бровки поймы – они возвышались над урезом на высоту 1,7 м [31].

Систематические наблюдения за уровнем воды в истоке р. Сунгач (у с. Новомихайловка) начали производиться Амурским водным управлением с 1912 г. Водомерный пост был открыт на правом берегу, в 200 м ниже выхода реки

из оз. Ханка. По данным измерений уклон водной поверхности в районе этого поста составляет 0,03 %, а общее падение на 200 м не превышает 0,6 см. Поэтому данные по посту в пределах точности измерений отражают колебания уровня воды оз. Ханка. Режимные наблюдения воды у с. Новомихайловка неоднократно прерывались и вновь возобновлялись без увязки нулей постов. Увязка уровней была выполнена Васьковским М. Г. [1], по результатам которой рекомендуется для приведения данных наблюдений за разные годы к одному нулю постов (66,00 м БС 77) к значениям уровня воды ввести следующие поправки: 1912–1919 гг. +1,65; 1927–1930 гг. –2,37; 1934–1936 гг. –2,22; 1937–1938 гг. +0,15; 1955–1958 гг. –2,05. В дальнейшем уровенный режим р. Сунгач изучался еще на четырех постах, но к 1960-м гг. прошлого столетия все наблюдения были прекращены.

Эпизодические измерения расходов воды в истоке р. Сунгач производились в 1890 г. Р. О. Юргенсоном, в 1914 г. – А. И. Булгаковым [39]. Более детальные наблюдения были организованы Управлением Дальреса в 1928–1934 гг. В пояснении к расчёту водного баланса оз. Ханка, выполненному в 1933 г. А. И. Булгаковым, указывается, что для определения стока р. Сунгач была построена кривая  $Q=f(H)$  (в нижней части – до уровня  $H = 280$  см над нулём поста). Однако материалы этих расчетов не сохранились.

В «Справочнике по водным ресурсам СССР, том 18, Дальне-Восточный район» [45], отмечается, что, по материалам наблюдений, «естественная зарегулированность режима р. Сунгач озером Ханка нарушается наличием в ее истоке бара, который благодаря своей неустойчивости является причиной, изменяющей объем воды, отдаваемой озером реке. Влияние бара на режим реки особенно сказывается зимой, вследствие забивания фарватера бара льдом, когда уровень р. Сунгач падает почти на 1,5 м». В период с 1918 по 1934 гг. по данным [45] на р. Сунгач у с. Павло-Федоровское, выше устья р. Белой, было измерено 38 расходов воды, из них 5 – в зимний период. Измерениями было освещено 95 % амплитуды колебания уровня, но точки на кривой  $Q=f(H)$  были значительно разбросаны, и однозначная связь расходов воды с уровнем не прослеживалась. Средний расход воды р. Сунгач за 7-летний период у с. Павло-Федоровское составил  $54 \text{ м}^3/\text{с}$ . Согласно [45] «при среднем стоянии уровня воды в оз. Ханка средний расход р. Сунгач можно ориентировочно считать равным  $50 \text{ м}^3/\text{с}$ , а при максимальном и минимальном – соответственно  $84$  и  $38 \text{ м}^3/\text{с}$ ».

Детально сток р. Сунгач изучался в 1957, 1958 гг. Приморским управлением Гидрометслужбы, тогда с 27/XII 1957 г. по 13/VIII 1958 г. было измерено 20 расходов воды у с. Новомихайловка. Анализ измеренных расходов и уровней воды показал, что между ними также нет однозначной зависимости, и за период открытого русла можно наметить четыре кривые  $Q=f(H)$  (рисунки б.23), соответствующие,

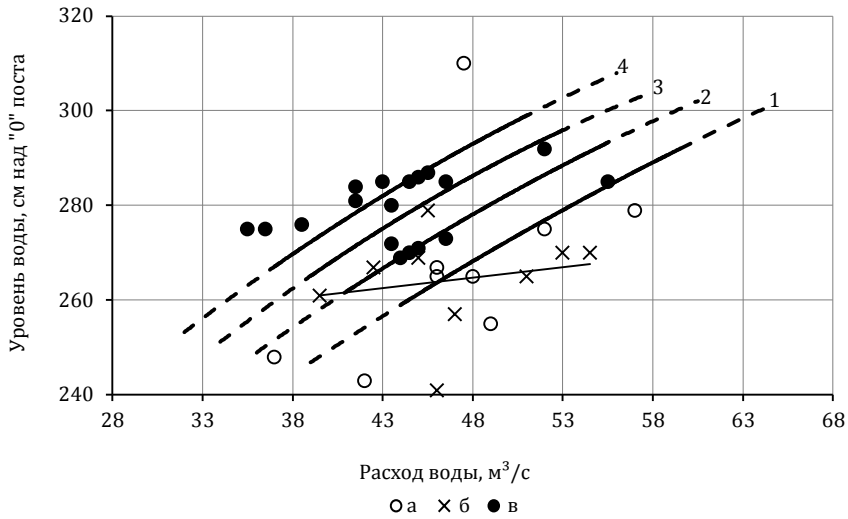
очевидно, различной высоте гребня бара в истоке реки. измеренный 30.05 при том же уровне расход воды составил всего 44,7 м<sup>3</sup>/с. Дальнейший размыв бара имел место, очевидно, 7, 8 и 17.07 (в последнем случае по ст. Турий Рог отмечен ветер западного и западно-северо-западного направлений со скоростью 8–10 м/с). Следует отметить, что ветровое поле над акваторией озера имеет сложный характер и отсутствие наблюдений в истоке р. Сунгач затрудняет анализ условий переформирования поверхности бара.

Однако синхронные наблюдения за стоком воды и положением гребня бара не проводились, и указанное выше предположение можно лишь косвенно подтвердить данными о скорости и направлении ветра. Из визуальных наблюдений известно, что при сильных и продолжительных ветрах юго-западного направления происходит перемещение наносов вдоль восточного берега озера и рост песчаной отмели (бара) в истоке р. Сунгач.

При ветре западного и особенно западно-северо-западного направлений под действием нагонных течений и сильного штормового волнения происходит, наоборот, размыв и понижение гребня бара. Таким образом, при одном и том же уровне воды в озере расход воды через исток р. Сунгач будет зависеть от высоты бара. Так, например, 23.05.1958 г. расход воды, измеренный при уровне 285 см, составлял 55,6 м<sup>3</sup>/с, а 28.05 по ст. Турий Рог отмечен ветер южного и юго-юго-западного направлений со скоростью 6–8 м/с, который способствовал увеличению гребня бара в истоке р. Сунгач. Подсчет поверхностного стока воды из озера за 1958 г. по данным измерений выполнен по четырем кривым  $Q=f(H)$ , соответствующим отдельным периодам открытого русла (за январь–апрель сток подсчитан по интерполяции между измеренными расходами воды). Согласно этим расчётам, расходы воды в р. Сунгач изменялись в пределах 35,4–67,6 м<sup>3</sup>/с (по материалам измерений за этот период – в пределах 35,4–55,6 м<sup>3</sup>/с).

На *рисунке 6.23* нанесены также данные измерений у с. Новомихайловка за 1928–1930 гг. и у с. Павло-Федоровское за 1928–1929 гг. Расходы воды и площади живого сечения русла реки за эти годы при соответствующих уровнях не отличаются значительно от данных измерений 1958 г. Измеренные в разное время расходы воды в истоке р. Сунгач изменяются от 35,4 до 64,7 м<sup>3</sup>/с. По данным наблюдений за стоком воды р. Сунгач у с. Павло-Федоровка (ниже устья р. Белой, площадь водосбора 22100 км<sup>2</sup>) среднее значение расхода воды за четыре года (1931–1934 гг.) составляет 53,9 м<sup>3</sup>/с; среднегодовой расход р. Белой у с. Руновка равен 2,79 м<sup>3</sup>/с.

Колебания уровня на посту р. Сунгач – с. Новомихайловка в период свободного состояния русла и поверхности озера практически отражают изменения уровня воды в озере. На *рисунке 6.24* приведен график связи среднего уровня воды оз. Ханка, вычисленного по постам Турий Рог и Астраханка, от уровня воды на р. Сунгач – с. Новомихайловка, построенный по данным наблюдений в дни измерения расходов воды.



а – расходы воды, измеренные у с. Новомихайловка в 1928–1930 гг.; б – то же у с. Павло-Федоровское в 1928, 1929 гг.; в – то же у с. Новомихайловка в 1957, 1958 гг. 1 – кривая расходов воды для периода с 1 по 29.05. 1958 г., 2 – то же с 30.05 по 7.07, 3 – с 8 по 16.07, 4 – с 17.07 по 1.09. 1958 г.

Рисунок 6.23 – Зависимости расходов воды р. Сунгач у с. Новомихайловка и с. Павлово-Федоровское от уровня озера за различные годы

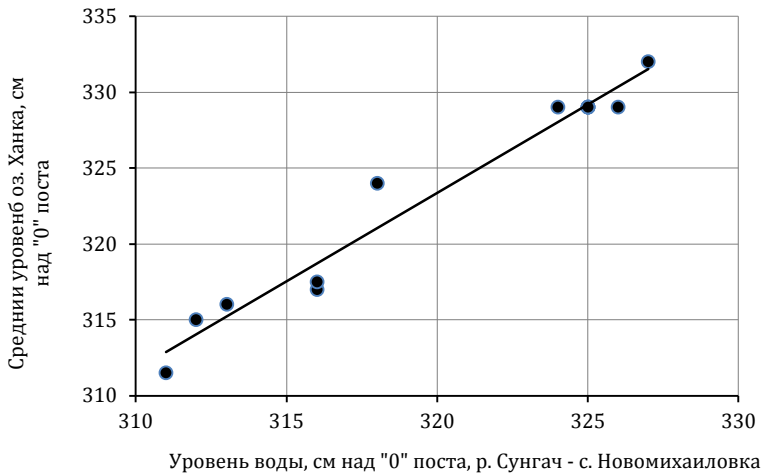


Рисунок 6.24 – Зависимость среднего уровня оз. Ханка от уровня воды на ГП р. Сунгач – с. Новомихайловка, 1958 г.

Из материалов наблюдений были исключены сильно отклонившиеся от графика точки, относящиеся к 12 и 22 июля. Вероятнее всего их отклонение объясняется различным ветровым влиянием на уровни озера и р. Сунгач у с. Новомихайловка. Коэффициент корреляции полученной связи составил 0,97, а сама зависимость представляется следующим уравнением:



$$H_{оз.ср.} = 1,0792 \cdot H_{НМ} - 22,1 \quad (6.10)$$

где  $H_{оз.ср.}$  – средний уровень озера, вычисленный по двум ныне действующим озёрным постам: Турий Рог и Астраханка;  $H_{НМ}$  – уровень воды на посту с. Новомихайловка. Уровни воды приведены к высотным отметкам, действующим с 1994 г., и выражены в сантиметрах над «0» поста.

Достаточно тесная связь рассматриваемых характеристик свидетельствует о том, что отток из озера по р. Сунгач напрямую зависит от положения уровня озера. В дальнейшем это было использовано для оценки стока из озера по этому водотоку.

По характеру колебаний уровня воды в озере в работе [1] выделяются три сезона: зима, весна и лето–осень. Нами таких различий в связи уровней озера и на р. Сунгач в указанные сезоны не выявлено. В зимний период при наличии ледовых явлений связь уровней озера и в истоке р. Сунгач отсутствует.

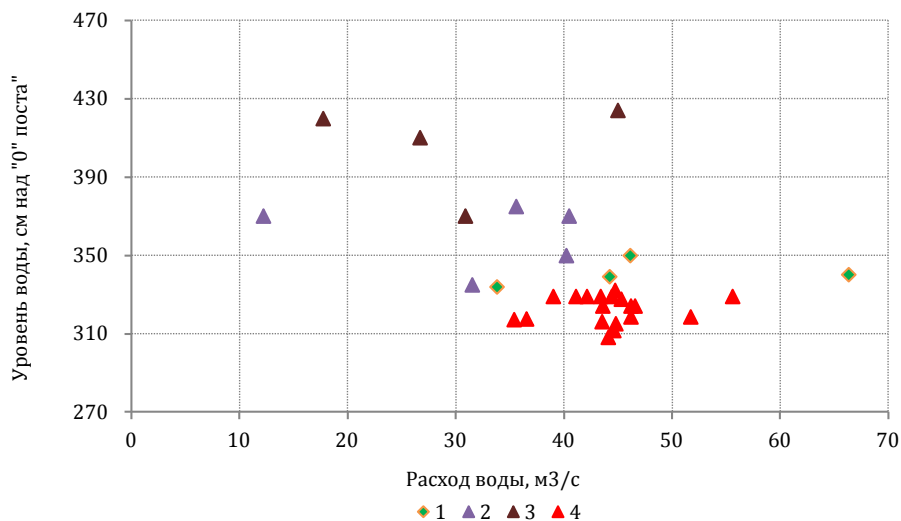
Начиная с 2007 г. измерения расходов воды в верховье реки Сунгач выполнялись в рамках Российско-Китайского мониторинга. За период с 2007 по 2015 гг. было измерено 23 расхода воды (таблица 6.18).

Таблица 6.15

Расходы воды, измеренные в ходе Российско-Китайского мониторинга

Дата	Уровень	Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Ширина реки, м	Средняя глубина, м	Средняя скорость, м/с
20.06.2007	340	66,3	109	1,62	0,31
24.08.2007	320	47,9	50	2,20	0,42
28.02.2008	318	26,8	54	1,40	0,49
26.08.2008	350	46,1	51	2,24	0,4
21.05.2009	334	33,8	52	1,75	0,37
10.09.2009	339	44,2	50	2,60	0,34
14.05.2010	370	40,5	56	2,60	0,36
19.08.2010	390	48,5	57	3,30	0,34
14.10.2010	370	45,2	58	2,45	0,32
24.02.2011	370	28,5	54	2,16	0,24
19.05.2011	375	35,6	62	2,18	0,26
25.08.2011	370	12,2	57	2,02	0,11
24.02.2012	345	15,3	50	1,76	0,17
18.05.2012	350	40,2	59	1,98	0,34
24.08.2012	335	31,5	58	1,90	0,29
28.02.2013	350	32,4	55	1,85	0,32
16.05.2013	370	30,9	69	2,00	0,22
29.08.2013	420	17,7	65	2,94	0,09
27.02.2014	387	36,7	70	1,83	0,29
22.05.2014	410	26,7	74	2,09	0,17
21.08.2014	424	45,0	77	2,34	0,25
05.02.2015	390	26,5	65	1,94	0,21
29.08.2015	430	47,7	50	2,61	0,37

На *рисунке 6.25* приведен график зависимости расходов воды р. Сунгач от среднего уровня воды в озере на момент измерения расхода воды. Как видно из графика однозначная связь расходов р. Сунгач и среднего уровня озера не прослеживается. Для того, чтобы выявить тенденцию изменения пропускной способности русла во времени, точки, соответствующие измеренным расходам воды (ИРВ) за трехлетние периоды 2007–2009, 2010–2012, 2013–2015 гг., отмечены разными значками.



1 – ИРВ 2007-2009 гг.; 2 – ИРВ 2010- 2012 гг.; 3 – ИРВ 2013-2015 гг.; 4 - ИРВ 1958 г.

*Рисунок 6.25* – Зависимость среднего уровня озера Ханка от уровня воды на р. Сунгач – с. Новомихайловка, 1958 г.

На этот же график нанесены измеренные расходы воды 1958 г. Уровни воды 1958 г. приведены к действующим в настоящее время высотным отметкам. Положение точек измеренных расходов воды на графике свидетельствует о существенном уменьшении пропускной способности русла в последние годы по сравнению с 1958 годом: при средних уровнях воды примерно на 30 м<sup>3</sup>/с.

Дальнейший анализ данных Российско-Китайского мониторинга и результаты полевых работ, полученные полевыми отрядами Приморского УГМС и Государственного гидрологического института в мае–июне 2016 г., показали, что сведения о расходах воды, измеренных в рамках Российско-Китайского мониторинга, нельзя принимать во внимание. Скорее всего, эти данные содержат недопустимые погрешности, оценить которые количественно не представляется возможным из-за отсутствия исходных полевых материалов по этим измерениям. В дальнейшем для оценки пропускной способности русла р. Сунгач использовались только результаты полевых экспедиционных работ, выполненных в 2016 г., а также данные наблюдений 1958 г. и более ранних лет.

Исторические сведения об измеренных расходах р. Сунгач по данным различных источников приведены в *таблице 6.19*.

Во время полевых экспедиционных работ 2016 г. на р. Сунгач, в том числе и в её истоке были выполнены измерения расходов воды. Измерения выполнялись только в русловой части потока в условиях затопленной поймы. Для оценки пропускной способности реки Сунгач был взят гидрометрический створ №2, наиболее близкий к положению ранее действовавшего поста у с. Новомихайловка. К сожалению, во время производства наблюдений практически во всех створах не было возможности выполнить полноценные измерения по всему поперечному сечению реки, так как не удалось измерить скорости течения и глубины на пойме, а также в десятиметровой зоне от китайского берега.

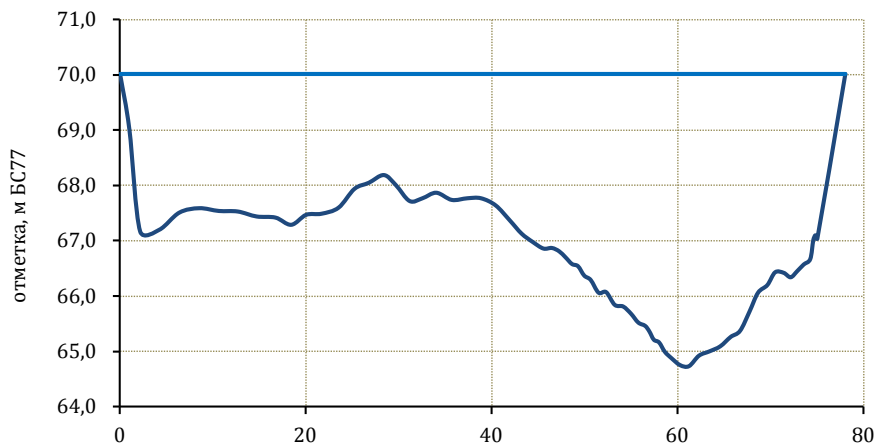
*Таблица 6.19*

Исторические сведения об измеренных расходах р. Сунгач по данным различных источников

Автор/источник	Место измерения расхода	Год, дата измерения расходов, их количество	Уровень оз. Ханка на дату измерения расхода (пост), см	Расход р. Сунгач, м <sup>3</sup> /с
Справочник по водным ресурсам СССР [45]	с. Павло-Федоровское	1918–1934 гг. 38 расходов, в т.ч. 5 в зимний период	нет сведений	54,0 средний за период
Справочник по водным ресурсам СССР [45]	нет сведений	1912–1930 гг. количество измеренных расходов неизвестно	средний максимальный минимальный	~ 50,0 ~ 80,0 ~ 38,0
М. Г. Васьковский [46]	с. Новомихайловка	1957–1958 гг. 20 расходов, в т.ч. 4 в зимний период	нет сведений	36,0–56,0
Материалы по гидрологии Дальневосточного края, [77]	выше устья р. Белой	09.07.1928 г. 19.06.1928 г. 20.07.1928 г. 20.08.1928 г.	нет сведений нет сведений нет сведений нет сведений	46,4 42,2 48,0 36,8
Р. О. Юргенсон [39]	исток р. Сунгача	20.10.1890 г.	нет сведений	43,1
М. Г. Васьковский [1]	исток р.Сунгача	23.05.1958 г. 30.05.1958 г.	285 – Турий Пор 285 – Турий Пор	55,6 44,7

Поэтому надо считать, что измеренные значения расходов воды занижены из-за недоучета стока по пойме и у китайского берега. Окончательная оценка стока в истоке р. Сунгач выполнена по гидравлической зависимости, полученной расчетным путем с использованием результатов полевых обследований реки. На *рисунке 6.26* приведен поперечный профиль реки Сунгач в створе №2.

Расход воды в этом створе был измерен 19 мая при среднем уровне озера 441 см над «0» поста и составил  $72,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , при ширине русла 74,9 м и площади поперечного сечения  $233 \text{ м}^2$ . Зависимость площади поперечного сечения русла реки в этом створе от среднего уровня озера представлена на *рисунке 6.27*.



*Рисунок 6.26* – Профиль русла реки Сунгач в створе №2



*Рисунок 6.27* – Зависимость площади поперечного сечения в створе №2

В связи с отсутствием возможностей выполнить надежные наблюдения, было принято решение считать, что измеренные значения расходов воды занижены из-за недоучета стока по пойме и у китайского берега, а для расчета пропускной способности русла непосредственно в истоке реки использована гидравлическая зависимость Шези-Маннинга и полученная в ходе проведения экспедиционных работ зависимость площади поперечного сечения русла.

Формула Шези для расчета расхода воды имеет вид:

$$Q = \omega C \sqrt{RI} \quad (6.11)$$

где  $\omega$  – площадь поперечного сечения русла,  $I$  – уклон водной поверхности,  $C$  – коэффициент Шези, который является функцией гидравлического радиуса  $R$  (средней глубины  $h$  для речных русел) и коэффициента шероховатости  $n$ . Наиболее распространенной формулой для оценки коэффициента Шези является формула Маннинга:

$$C = \frac{h^{1/6}}{n} \quad (6.12)$$

Уклон водной поверхности непосредственно в истоке реки Сунгач невелик. По данным измерений 1958 г. он составляет 0,03–0,04‰. Нами для расчета принята величина 0,03‰. Эта величина подтверждается измерениями 2016 г., выполненными в самом истоке реки. Коэффициент шероховатости в соответствии со шкалой шероховатости принят равным от 0,023 для самых низких уровней с возрастанием до 0,032 при полном наполнении русла с выходом на пойму [78]. В *таблице 6.20* приведены опорные точки, по которым рассчитана зависимость расходов от уровней воды непосредственно в истоке реки Сунгач.

*Таблица 6.16*

Расчет расходов воды в истоке реки Сунгач по гидравлической зависимости

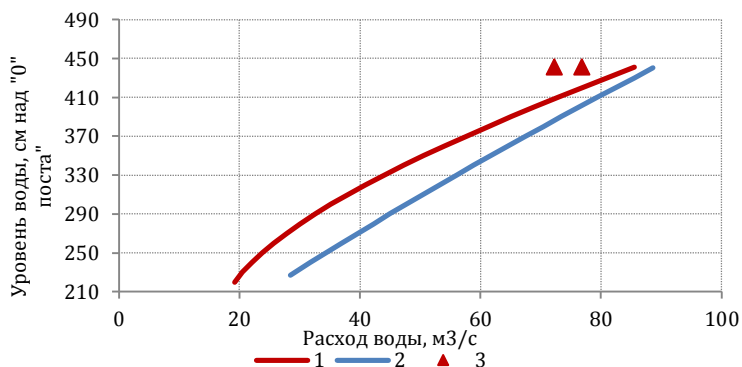
Средний уровень озера, см над «0 поста	Площадь поперечного сечения, м <sup>2</sup>	Средняя глубина, м	Уклон водной поверхности, ‰	Коэффициент шероховатости, n	Коэффициент Шези, C	Расход воды, м <sup>3</sup> /с
441	234	3,12	0,03	0,032	37,8	85,4
400	203	2,71	0,03	0,032	37,5	68,6
360	173	2,31	0,03	0,030	37,7	54,2
340	158	2,11	0,03	0,030	37,7	47,4
320	143	1,91	0,03	0,030	37,1	40,1
300	128	1,71	0,03	0,028	39,0	35,8
280	112	1,54	0,03	0,027	39,8	30,4
250	76	1,62	0,03	0,024	45,2	23,8
220	62	1,51	0,03	0,023	46,6	19,4

Принятые для расчета стока р. Сунгач в его истоке зависимости от среднего уровня оз. Ханка приведены на *рисунке 6.28*. Она отражает пропускную способность русла р. Сунгач на сегодняшний день при свободном состоянии русла в диапазоне уровней воды от 220 до 441 см над «0» поста или в диапазоне отметок уровня

от 67,81 до 70,02 м БС 77. Средний уровень озера рассчитывается как среднее арифметическое из значений уровней по озерным постам Турий Рог и Астраханка для одного и того же срока или периода времени. Аналитическая аппроксимация зависимости получена в виде следующего уравнения:

$$Q(H) = 61,717 - 57,061 \cdot H + 20,145 \cdot H^2 - 1,357 \cdot H^3, \quad (6.13)$$

где  $Q(H)$  – расход воды в м<sup>3</sup>/с,  $H$  – уровень, выраженный в метрах над «0» поста.



1 – КР 1995- 2016, 2 – КР 1958, 3 – ИРВ 2016 г.

Рисунок 6.28 – Зависимости расходов воды в истоке реки Сунгач от среднего уровня оз. Ханка

На этом же рисунке нанесена осредненная зависимость  $Q(H)$  1958 г. Она аппроксимирована следующим уравнением:

$$Q(H) = -14,206 + 20,12 \cdot H + 1,38H^2, \quad (6.14)$$

На рисунке 6.29 представлена зависимость расходов от уровней воды в озере за 1995–2016 гг., но уже в отметках системы мБС 77.

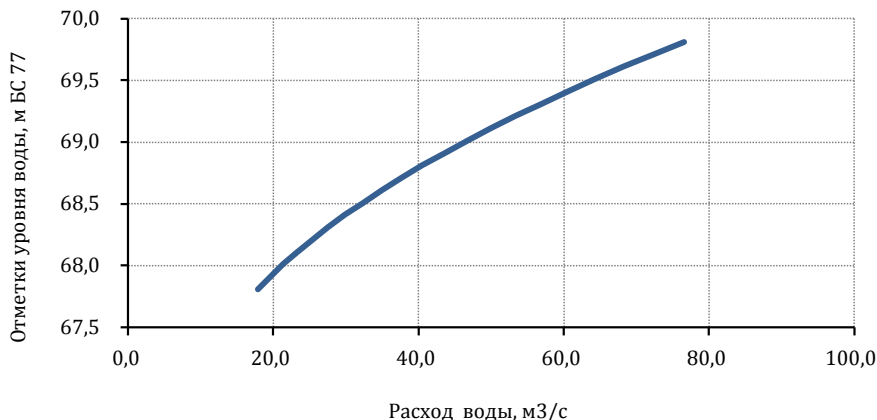


Рисунок 6.29 – Зависимость среднегодовых расходов воды в истоке р. Сунгач от среднегодового уровня воды озера

Сток воды в истоке р. Сунгач был вычислен за период с 1949 по 2015 гг. Среднегодовые расходы воды определялись, как среднее из их среднемесячных значений. Для периода с 1949 по 1985 гг. средние месячные расходы воды для свободного состояния русла вычислялись по зависимости  $Q(H)$  1958 г. (6.14). Можно предположить, что в этот период пропускная способность русла р. Сунгач в ее истоке не могла значительно меняться, так как на реке существовало судоходство, и для обеспечения свободного прохода судов из озера в р. Сунгач и обратно регулярно расчищалась прорезь в баре, снижающем пропускную способность р. Сунгач. После 1986 г. судоходство прекратилось и прорезь в баре постепенно заилилась, что привело к снижению пропускной способности реки при низких и средних уровнях озера – примерно на  $10\text{--}12 \text{ м}^3/\text{с}$  по сравнению с 1958 г. При высоком стоянии уровня озера влияние бара на пропускную способность русла р. Сунгач несущественно.

Зависимость (6.13), характеризующая пропускную способность русла р. Сунгач в настоящее время, использовалась для расчета стока при свободном состоянии русла в период с 1995 по 2015 гг. С 1986 по 1995 гг. использовалась переходная кривая от зависимости 1958 г. к зависимости (6.13). Ее аналитическое выражение представлено ниже:

$$Q(H) = 27,959 \cdot H - 40,396. \quad (6.15)$$

В зимний период при наличии ледовых явлений на озере, снижающих пропускную способность русла в истоке р. Сунгач, расходы воды для всех периодов вычислены по формуле:

$$Q_{\text{зим}} = K_{\text{зим}} \cdot Q_{\text{св}}(H_{\text{зим}}), \quad (6.16)$$

где  $Q_{\text{зим}}$  – средний месячный расход воды в зимний месяц,  $Q_{\text{св}}(H_{\text{зим}})$  – расход воды, полученный для значения среднемесячного уровня зимнего месяца по зависимости для свободного состояния русла,  $K_{\text{зим}}$  – переходный коэффициент зимнего стока. Для периода с 1949 по 1985 гг. коэффициент зимнего стока принят равным 0,94, а для периода с 1986 по 2015 гг. – равным 0,97. Увеличение коэффициента зимнего стока в последнем периоде связано с тем, что зимы в эти годы в бассейне оз. Ханка стали более мягкими, и ледяной покров в истоке реки Сунгач – менее устойчивым.

Окончательно, для удобства расчетов и анализа данных за многолетний период была получена зависимость среднегодовых расходов воды в истоке р. Сунгач от среднегодового уровня воды озера в диапазоне отметок уровня от 67,81 до 69,81 м БС 77 (рисунок 6.31). Эта зависимость действительна с 1995 г. по настоящее время.

Ее аналитическое представление получено в виде следующего уравнения:

$$Q(H) = -10,891 + 3,2212 \cdot H + 0,315 \cdot H^2. \quad (6.17)$$

При этом расходы воды выражены в  $\text{м}^3/\text{с}$ , уровни в м над «0» поста.

## 6.7 Сток из озера по водоотводящим каналам

Для оценки фактической пропускной способности Сунгачинского канала в современных условиях были использованы данные промеров глубин и измерений расходов воды в его истоке. Расход воды в канале был измерен 17 июня при среднем уровне озера 446 см над «0» поста и составил  $10,6 \text{ м}^3/\text{с}$ , площадь поперечного сечения –  $27,8 \text{ м}^2$ . Поперечный профиль русла канала в этом створе приведен на *рисунке 6.30*.

По данным промеров глубин получена зависимость площади поперечного сечения от уровня воды в озере (*рисунок 6.31*).

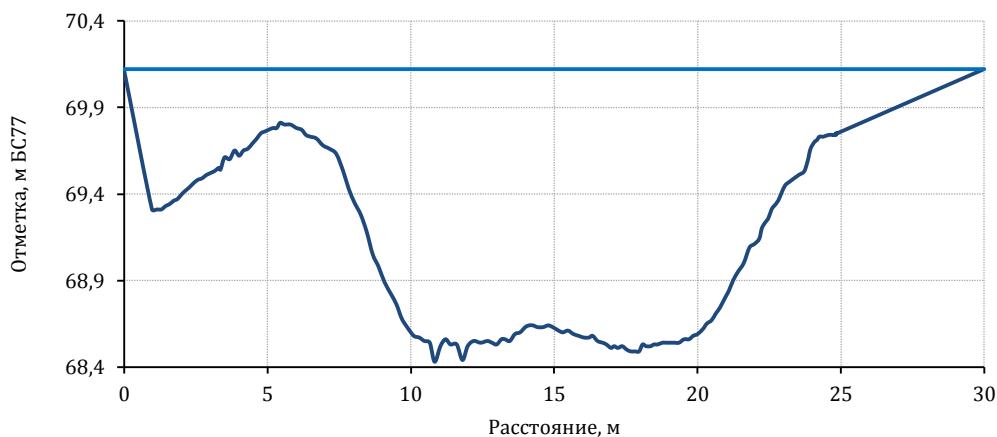
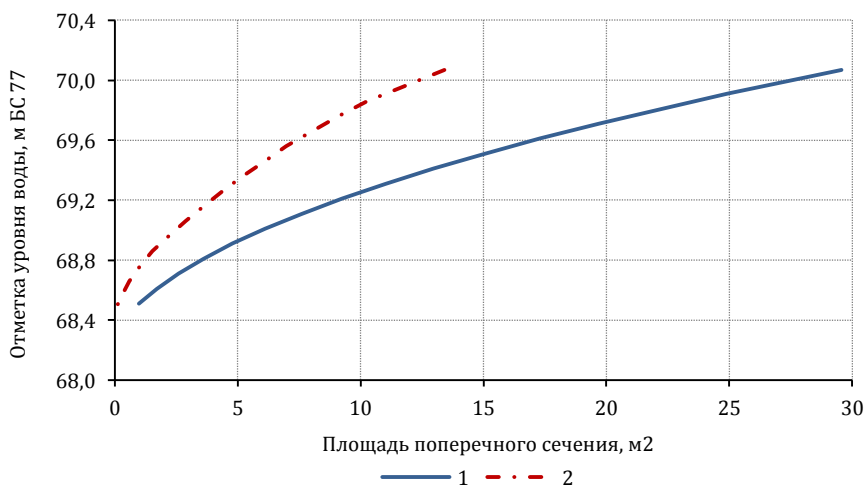


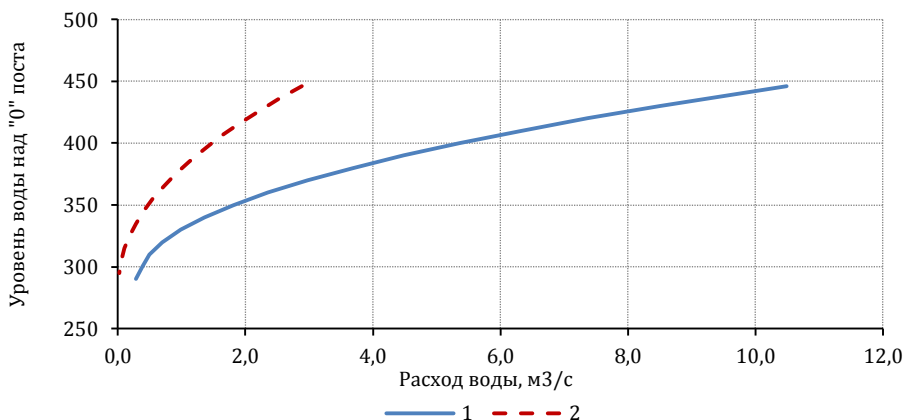
Рисунок 6.30 – Профиль канала Сунгачинский в створе №1



1 – исток Сунгачинского канала, 2 – канал без названия

Рисунок 6.31 – Зависимости площадей поперечного сечения в каналах





1 – исток Сунгачинского канала, 2 – канал без названия

Рисунок 6.32 – Зависимость расходов в истоках каналов от уровня в оз. Ханка

Из рисунка видно, что Сунгачинский канал начинает заполняться только при отметках уровня воды выше 68,5 м БС77. Зависимость расхода воды от уровня озера получена расчетным путем с использованием уравнений Шези и Маннинга (формулы 6.11 и 6.12). При этом коэффициент шероховатости канала принят равным 0,028 [78]. Мгновенный уклон в истоке канала вычислен при измерении расхода воды и составил 0,12‰. По результатам расчетов получена зависимость расхода от уровня воды в оз. Ханка, представленная на *рисунке 6.32*.

В настоящее время пропускная способность Сунгачинского канала как при низких, так и при высоких уровнях воды в оз. Ханка определяется не морфометрическими параметрами канала, а хаотическими инженерными сооружениями и мероприятиями в истоке канала и водопропускной трубой в его устье, обеспечивая при этом пропуск воды расходом всего лишь 10,6 м³/с.

Само русло канала при современных характеристиках обладает достаточной пропускной способностью и может пропускать по руслу канала без выхода воды на пойму расходы воды до 42 м³/с, что позволяет использовать современное русло канала (без лимитирующих его пропускную способность инженерных хаотических сооружений) в качестве регулирующего уровня воды в озере Ханка инженерного сооружения.

В ходе исследования была выполнена также оценка пропускной способности канала без названия. Расход в нем был также измерен 17 июня и составил 3,01 м³/с при площади поперечного сечения 12,5 м². Для расчета гидравлической зависимости приняты следующие характеристики: уклон водной поверхности – 0,05‰, коэффициент шероховатости – 0,029.

Зависимость площади поперечного сечения в истоке этого канала от среднего уровня озера приведена на *рисунке 6.31*. Следует отметить, что дно обоих каналов

находятся примерно на одной отметке, близкой к 68,5 м БС77. Зависимость расходов воды в истоке канала без названия от среднего уровня озера нанесена на тот же график, что и для Сунгачинского канала (рисунки 6.32). Обе эти зависимости были использованы для расчета стока из озера по указанным каналам.

Точных сведений о работе рассматриваемых каналов после ввода их в эксплуатацию найти не удалось. Достоверными можно считать только данные, полученные при их обследовании в июне 2016 г. В то же время известно, что Сунгачинский канал уже был построен в начале 1970-х годов прошлого столетия. На космических снимках 1972 г. он уже отчетливо виден. Логично предположить, что он начал работать и отводить воду из озера в связи с повышением его уровня с 1973 г., а, следовательно, и сток по водоотводящим каналам был рассчитан за период с 1973 г. по 2015 г. Для удобства расчета была получена зависимость суммарного по двум каналам расхода воды от среднего уровня озера (рисунки 6.33).

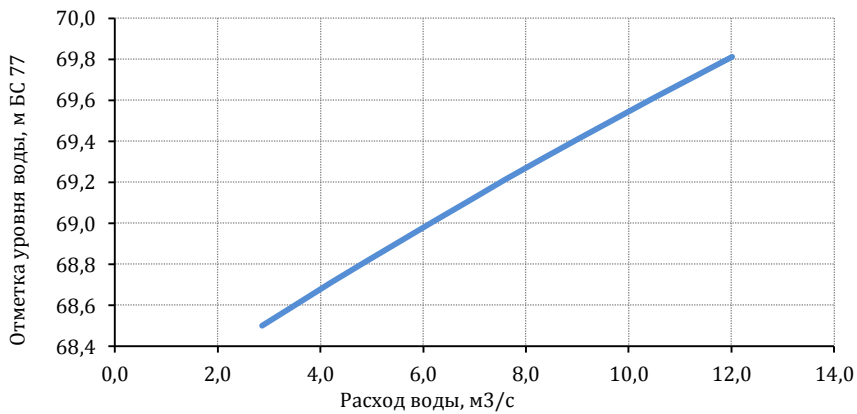


Рисунок 6.33 – Зависимость расходов воды по каналам

Аналитически эта зависимость аппроксимирована следующим уравнением:

$$Q(H) = -20.661 + 6.594 \cdot H + 0.2658H^2 \quad (6.18)$$

Сток, рассчитанный по водоотводящим каналам за период с 1973 по 2015 гг., был учтен в расчетах водного баланса озера.

## 6.8 Водообмен с озером Малая Ханка

Малая Ханка – пресное озеро близ северного берега оз. Ханка. Акватория озера целиком расположена в Китае. Длина озера в среднем около 37 км, ширина 5–13 км, площадь зеркала колеблется от 145 до 160 км<sup>2</sup> в зависимости от уровня воды.

Берега озера низменны и болотисты, глубина озера незначительна – 1–2 м. В озеро впадают 5 рек с общей площадью водосбора 926 км<sup>2</sup>.

Озера Малая Ханка и Ханка разделены природным песчаным перешейком длиной около 35 км и высотой 75 м над уровнем моря (на 5–6 м выше среднего уровня озера), шириной 10 м по ее верней отметке и 60–70 м у ее основания. В настоящее время водообмен между озерами регулируется тремя гидротехническими сооружениями. Схема водообмена между озерами Ханка и Малая Ханка была подробно описана выше в подразделе 5.3.1.

Ввиду отсутствия объективной информации по режиму и величинам водообмена между озерами Ханка и Малая Ханка был выполнен приближенный расчет сбросов воды через ГТС в оз. Ханка по данным ретроспективных космических снимков.

Сразу следует отметить, что во всех случаях сброс воды через ГТС осуществляется из оз. Малая Ханка в оз. Ханка. Не найдено пока ни одного подтверждения перетока в обратном направлении, несмотря на наличие насосной станции на ГТС-3.

На космических снимках Landsat за различные годы отчетливо просматриваются шлейфы стока воды в Малую Ханку по ее северному берегу и выноса воды через ГТС в оз. Ханка. На всех снимках обращает на себя внимание тот факт, что сбросы в оз. Ханка осуществляются именно тогда, когда наблюдается интенсивный приток в оз. Малая Ханка.

Поскольку приток из оз. Малая Ханка является одной из составляющих водного баланса оз. Ханка, для его оценки был составлен ориентировочный водный баланс оз. Малая Ханка за период 1949–2015 гг.

В озеро Малая Ханка впадают 5 рек с общей площадью водосбора 926 км<sup>2</sup>. Их суммарный приток в озеро был рассчитан методом аналогии по модулю стока р. Большие Усачи, ближайшей к водосбору оз. Малая Ханка. Среднеголетняя величина притока составила 0,09 км<sup>3</sup> или 610 мм.

Годовые осадки, выпавшие на поверхность озера, приняты по данным наблюдений на метеостанции Турий Рог, они составляют 619 мм (0,09 км<sup>3</sup>).

Испарение с водной поверхности принято аналогичным таковому для оз. Ханка – 666 мм (0,10 км<sup>3</sup>).

Результаты расчетов естественных составляющих водного баланса оз. Малая Ханка представлены на *рисунке 6.34*. Этот баланс в условно-естественном режиме может быть принят до 1995 г.

Остаточный член баланса, практически всегда положительный, представляет собой естественный сток из оз. Малая Ханка, который учитывался при составлении водного баланса оз. Ханка (*рисунок 6.35*). Среднеголетняя величина стока составила 0,085 км<sup>3</sup> в год.

Со второй половины 1990-х гг. на китайской части бассейна началось интенсивное развитие рисосеяния с широкомасштабным строительством ГТС, каналов и

РОС. Характерно, что именно с этого периода в водном балансе оз. Ханка стали наблюдаться значительные невязки, которые можно объяснить, в частности, возросшим антропогенным воздействием на китайской части бассейна.

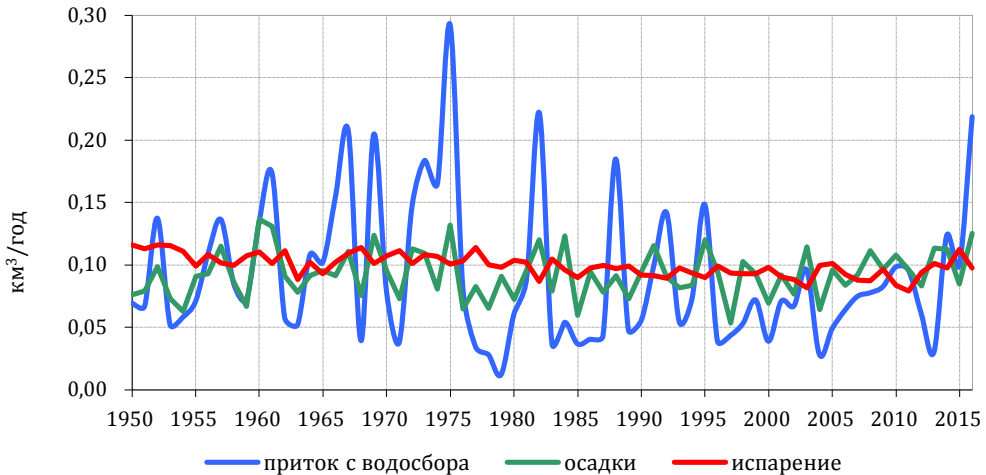


Рисунок 6.34 – Естественный водный баланс оз. Малая Ханка

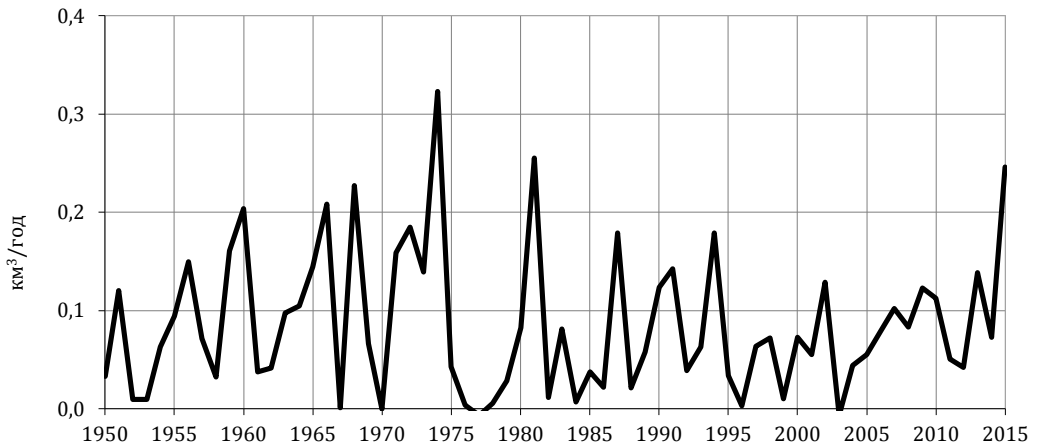


Рисунок 6.35 – Естественный сток из оз. Малая Ханка

Основную сложность представляет оценка притока в оз. Малая Ханка за счет переброски части стока р. Мулинхэ и водозаборов из озера на РОС. Здесь ввиду отсутствия объективной информации существует целый ряд неопределенностей:

- вододелиние между р. Мулинхэ и каналом Донгди в гидроузле Хубэй;
- вододелиние в водохранилище Циншань. Вода из водохранилища может поступать как в оз. Малая Ханка, так и в магистральный канал и р. Галатонг, откуда, в свою очередь, расходоваться на РОС, а избыток сбрасывается в р. Сунгач.

Оценка этих величин по годам была выполнена следующим образом:

1) Поскольку бассейны оз. Ханка и р. Мулинхэ расположены рядом и имеют близкие по величине площади водосбора, оценка стока р. Мулинхэ в створе гидроузла Хубэй была выполнена методом гидрологической аналогии по модулям притока в оз. Ханка с российской стороны. Среднегодовое значение стока составило  $1,26 \text{ км}^3$  в год.

2) Оценка вероятного регулирования стока гидроузлом Хубэй выполнена, исходя из текущей водности р. Мулинхэ в конкретные годы и с учетом средней многолетней величины подачи воды в канал Донгди  $0,65 \text{ км}^3$  [79]. На *рисунке 6.36* показаны результаты оценки стока р. Мулинхэ и его регулирования гидроузлом Хубэй.

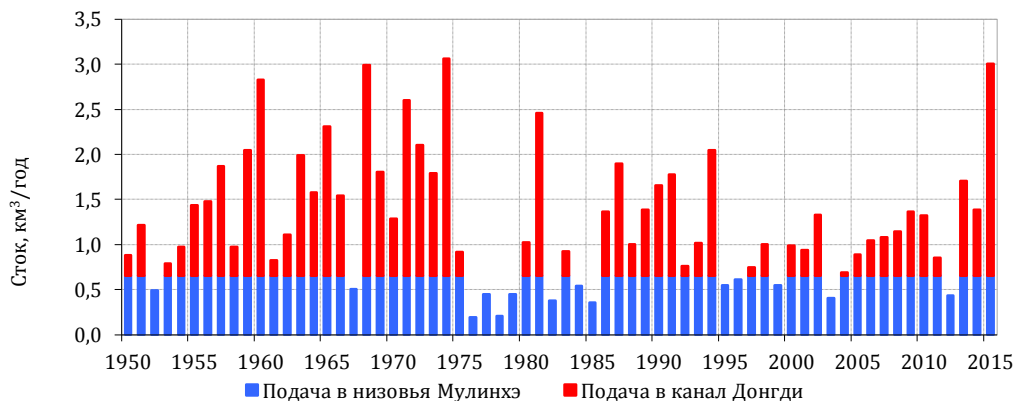


Рисунок 6.36 – Оценка регулирования стока гидроузлом Хубэй

3) Оценка величин водозабора на РОС за счет воды, поступающей из р. Мулинхэ, выполнена с учетом динамики площадей РОС на китайской территории, определенной по космическим снимкам (см. раздел 5.1.3), и оросительной нормы риса  $10 \text{ тыс. м}^3/\text{га}$ . Поскольку интенсивное развитие РОС со строительством инженерных сетей и ГТС началось с 1997 г., дальнейшие оценки сделаны для периода 1997–2015 гг. Средняя величина орошаемых площадей за этот период составила около  $680 \text{ км}^2$ . Расчетный водозабор на РОС с учетом маловодных лет, когда водозабор ограничен наличными водными ресурсами, составил  $0,39 \text{ км}^3$  в год. За этот же период расчетная подача в канал Донгди составила  $0,47 \text{ км}^3$  в год.

4) Оценка притока воды в оз. Малая Ханка из р. Мулинхэ за период 1997–2015 гг. получена вычитанием водозабора на РОС из общей подачи в канал Донгди и составила  $0,09 \text{ км}^3$  в год. Тогда оценка суммарного стока из оз. Малая Ханка в оз. Ханка составит в среднем  $0,17 \text{ км}^3$  в год. Эта величина, в принципе, не противоречит основным выводам по водному балансу оз. Ханка, однако очевидно, что в годы различной водности и в разные сезоны сбросы в оз. Ханка могут быть весьма различны.

То, что эти сбросы имеют место, было объективно показано на космических снимках за разные годы. Однако, учитывая бережное отношение населения Китая к возделыванию риса и его орошению, можно допустить, что на сброс уйдет только то количество воды, которое нельзя использовать на РОС или накопить для дальнейшего использования. Поэтому можно предположить, что холостые сбросы осуществляются только во время высоких паводков, которые здесь происходят часто, но, как правило, непродолжительны. Сбросы могут осуществляться высокими расходами воды, о чем свидетельствуют характеристики ГТС на перешейке озер Ханка и Малая Ханка (суммарно до 200 м<sup>3</sup>/с), но, очевидно, только кратковременно во время паводков, когда происходит интенсивный приток в оз. Малая Ханка. В годовом разрезе это влияние может оказаться в пределах точности определения притока в оз. Ханка.

Предварительная оценка влияния водообмена с оз. Малая Ханка, включая водохозяйственную деятельность на китайской территории бассейна, заключается в следующем:

- в средние по водности годы, когда объем забираемой воды из р. Мулинхэ примерно равен водопотреблению РОС, отрицательный эффект незначителен или может отсутствовать;
- в маловодные годы дефицит воды для орошения может покрываться за счет водных ресурсов, что может способствовать некоторому снижению уровня оз. Ханка;
- в многоводные годы и, особенно, в многоводные серии лет, в оз. Ханка могут сбрасываться излишки воды, поступающей в систему, что может привести к повышению уровня озера.

В целом функционирование и развитие водохозяйственной системы КНР в бассейне оз. Ханка может привести к увеличению амплитуды колебаний уровня воды в озере по сравнению с естественными условиями. Ввиду отсутствия объективной информации о величинах стока в оз. Ханка с китайской территории, количественные оценки влияния водохозяйственной деятельности на китайской территории бассейна весьма ориентировочны.

## 6.9 Эпизодические переливы из озера Ханка

Впервые наличие эпизодического поверхностного стока из озера при ветровых нагонах в восточной его части были установлены М. Г. Васьковским [1]. Анализируя отдельные составляющие водного баланса за сентябрь–декабрь 1958 г., он определил, что увеличение стока за эти месяцы не подтверждается данными наблюдений за уровнем воды на р. Сунгач. Тщательный анализ совмещенного графика уровня воды по трем постам показал, что было шесть случаев одновременного сгона воды. Соответственно, у восточного берега, очевидно, наблюдался большой нагон, в результате которого существенной объем воды мог переливаться через бровку

и поступать на низменную заболоченную прилегающую территорию. После прекращения нагона этот объем не возвращался в озеро. Экспедиционные исследования показали, что высота нагона составляла 0,8 м, эти данные подтвердил и опрос местных жителей. Таким образом, было подтверждено существенное влияние сгонно-нагонных дневеляций на составляющие водного баланса озера.

На основании этого анализа М.Г.Васьковский сделал вывод о том, что в расходные составляющие водного баланса следует ввести еще один компонент – «эпизодический поверхностный сток воды на прилегающую к восточному берегу низменность». Определение величины этой составляющей зависит, по справедливому мнению автора от точности определения уровня озера до и после нагона воды. Существовавшие в период подготовки монографии [1] пункты наблюдения за уровнем воды на озере Ханка и методики расчета уровня озера не позволяли надежно оценить объем этого дополнительного стока. Автор определял объем дополнительного эпизодического стока из озера «по совмещенным графикам колебания уровня воды (при наличии одновременного сгона по трем постам)». Из 23 лет, для которых М. Г. Васьковский выполнил погодичный расчет водного баланса, в 8 годах, по его мнению, наблюдался этот дополнительный сток, величина его изменялась от 0,08 км<sup>3</sup> в 1956 г. и 1967 г. до 0,36 км<sup>3</sup> в 1958 году, что составляло от 4,7 % в 1967 г. до 25,9 % в 1958 г. от постоянного поверхностного стока по р. Сунгач.

Необходимо отметить, что после написания монографии один из трех постов (Сопка Лузанова) был закрыт, то есть погрешность оценки этого дополнительного эпизодического стока существенно увеличилась. Анализ данных, опубликованных в [80], [81], показал, что в многоводные годы при среднегодовых уровнях озера более 68,70 м БС 77 возможны переливы воды в низменной восточной части озера через бровку («дополнительный эпизодический поверхностный сток») при сильных ветровых нагонах. Количественно оценить его при наличии существующих в настоящее время озерных постов не представляется возможным. Как уже упоминалось, в настоящее время на озере действуют два озерных поста и оба на западном берегу. Можно с уверенностью говорить, что при сгоне воды на посту с. Турий Рог при ветрах преобладающего направления З-ЗСЗ-СЗ-ССЗ на восточном берегу озера будет наблюдаться нагон. При максимальных значения сгона на посту с. Турий Рог следует ожидать также значительных нагонов на восточном низменном берегу; величину этого нагона определить корректно невозможно.

В *таблице 6.21* приведены данные по сгонам воды оз. Ханка – с. Турий Рог за годы с высокими среднегодовыми уровнями. В качестве примера рассмотрим год 1974 и год 1975. Так, в 1974 году при среднем уровне 69,22 м БС 77 наблюдались два сгона с величинами спада 49 и 47 см при ветрах преобладающих направлений ЗЮЗ и СЗ-ССЗ скоростью 8–10 м/с, причем падение уровня началось с отметок уровня 69,61 и 69,59 м соответственно.

## Уровни воды при сгонах оз. Ханка – с. Турий Рог

Год	Средний уровень воды, м БС 77	Величина спада уровня при сгоне, см	Отметки уровня в начале сгона, м БС 77	Общая продолжительность сгона, часы	Ветер при нагоне (сгоне)		Вероятность дополнительного стока
					Преобладающее направление, румбы	Преобладающая скорость, м/с	
1972	68,90	39	69,05	54	3-3СЗ	7-10	Близка к 100%
		20-30	69,15	40	СЗ-3СЗ	6-9	Близка к 100%
1973	69,25	19	69,15	36	3СЗ	5-10	Близка к 100%
		11-14	69,49	36	3-3СЗ	2-7	Близка к 100%
1974	69,22	49	69,61	108	ЗЮЗ	8-11	Близка к 100%
		47	69,59	40	СЗ-ССЗ	8-10	Близка к 100%
		20-24	69,58	19	СЗ-3СЗ	6-8	Близка к 100%
		15-19	69,56	10	С-СЗ	3-7	Близка к 100%
		11-14	69,60	5	3-СЗ	4-6	Близка к 100%
1975	69,35	30-34	69,31	12	СЗ-3	7-8	Близка к 100%
		25-29	69,21	36	СЗ-3	2-6	Близка к 100%
		20-24	69,35	24	СЗ	2-4	Близка к 100%
1976	68,78	41	68,48	35	3	3-7	Существует
		28	68,60	68	С-ССВ	2-5	Мало вероятно
		23	68,62	20	3СЗ	2-4	Существует
1991	68,84	29	69,10	31	3СЗ	6-8	Близка к 100%



Год	Средний уровень воды, м БС 77	Величина спада уровня при сгоде, см	Отметки уровня в начале сгона, м БС 77	Общая продолжительность сгона, часы	Ветер при нагоне (сгоде)		Вероятность дополнительного стока
					Преобладающее направление, румбы	Преобладающая скорость, м/с	
		25	69,04	130	ЗСЗ-СЗ	4-6	Близка к 100%
		20	68,61	84	ЗСЗ-СЗ	14	Существует
		15-19	69,09	14	ЗСЗ-СЗ	6-12	Близка к 100%
1992	68,90	11-15	68,98	65	З-СЗ	4-10	Близка к 100%
1994	68,79	15-19	69,28	24	З-СЗ	7-10	Близка к 100%
		11-14	69,29	30	СЗ	3-8	Близка к 100%
1995	69,10	52	68,96	43	ЗСЗ-ССЗ	6-10	Близка к 100%
		20-25	69,07	38	З-СЗ	5-8	Близка к 100%
		11-14	69,08	15	З-ССЗ	4-6	Близка к 100%
1996	68,89	26	68,74	22	З-СЗ	10	Существует
		20-24	68,61	17	С	2-4	Мало вероятно
1997	68,71	26	68,74	22	З-СЗ	10	Существует
		20-24	68,61	17	С	2-4	Мало вероятно
2003	68,93	29	68,67	58	СЗ	7	Близка к 100%
		22	68,70	42	ССЗ	5	Существует

Также наблюдались сгоны от 15 до 24 см при ветрах тех же направлений. С вероятностью сто процентов можно утверждать, что при одновременном нагоне на восточный берег озера происходил перелив воды через бровку. По имеющимся описаниям свидетельств затопления низменной восточной части озера были выполнены ориентировочные оценки объемов поверхностного стока в этом году, который был учтен при составлении водного баланса. За предшествующие годы, оценки объемов эпизодического поверхностного стока из озера были приняты по данным М. Г. Васьковского [1]. В 1975 г. при среднем уровне 69,35 м БС77 наблюдались три сгона с величинами спада 41, 28 и 23 см при ветрах преобладающих направлений З, С и ЗСЗ скоростью 2–7 м/с, падение уровня началось с отметок уровня 68,48–68,62. Также наблюдались сгоны от 15 до 24 см при ветрах тех же направлений. С высокой долей вероятности можно полагать, что при соответствующем нагоне на восточный берег озера также происходил перелив воды через бровку. Количественно оценить объем этого дополнительного стока очень затруднительно.

## 7. Водный баланс озера Ханка и причины современного повышения его уровня

### 7.1 Водный баланс озера Ханка за период 1949–2015 гг.

Изменение объема (уровня) воды оз. Ханка зависит от соотношения приходной и расходной составляющих его водного баланса, которые, в свою очередь, определяются влиянием комплекса естественных и антропогенных факторов. В самом общем виде эти изменения могут быть представлены в виде уравнения водного баланса озера:

$$\frac{dW(H)}{dt} = \sum \Pi - \sum P \quad (7.1)$$

где  $\frac{dW(H)}{dt}$  – изменение объема (уровня) озера за интервал времени  $dt$ ;

$\sum \Pi$  – суммарный приход воды в озеро;  $\sum P$  – суммарный расход воды из озера.

В свою очередь, суммарный приход воды определяется следующим уравнением:

$$\sum \Pi = Q_{росс.} + Q_{кит.} + Q_{М.Хан.} + P \quad (7.2)$$

где  $Q_{росс.}$  – приток речных вод в озеро с российской части водосбора,

$Q_{кит.}$  – приток речных вод в озеро с китайской части водосбора,  $Q_{М.Хан.}$  – приток

в озеро из оз. М. Ханка,  $P$  – осадки, выпадающие на поверхность оз. Ханка.

Суммарный расход воды из озера определяется по формуле:

$$\sum P = E - Q_{Сун.} - Q_{безв.} - Q_{пов.} - Q_{канал} \quad (7.3)$$

где  $E$  – испарение с поверхности озера,  $Q_{Сун.}$  – сток р. Сунгач,

$Q_{безв.}$  – безвозвратное водопотребление,  $Q_{пов.}$  – эпизодический поверхностный

сток,  $Q_{канал}$  – сток по водоотводящим каналам.

С использованием полученных в главе 6 данных был рассчитан погоди́чный водный баланс оз. Ханка за период 1949–2015 гг.

В *таблице 7.1* приведены все приходные составляющие водного баланса оз. Ханка за 1949–2015 гг. В среднем за этот период в озеро поступило 4,64 км<sup>3</sup>/год.

При этом объем осадков, выпавших на поверхность озера, равен 2,64 км<sup>3</sup>, что составляет 56,5 % от приходной составляющей водного баланса, приток с российской части водосбора равен 1,87 км<sup>3</sup> (40,0 %), приток с китайской территории оценен в 0,05 км<sup>3</sup> (1,1 %), и приток из оз. М. Ханка составил 0,11 км<sup>3</sup> (2,4 %). Очевидно, что приходная часть водного баланса в многолетней перспективе практически полностью определяется поступлением на акваторию водоема осадков и притоком речных вод с российской части водосбора озера.

Таблица 7.1

Приходные составляющие водного баланса оз. Ханка

Год	Приток с российской территории		Приток с китайской территории		Приток из оз. М. Ханка		Осадки		Суммарный приход	
	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>
1949	279	1,15	7	0,03	17	0,07	505	2,08	808	3,29
1950	525	2,14	7	0,03	17	0,07	551	2,24	1100	4,44
1951	602	2,45	17	0,07	34	0,14	686	2,79	1338	5,38
1952	185	0,75	7	0,03	12	0,05	586	2,37	791	3,18
1953	229	0,92	7	0,03	15	0,06	512	2,06	763	3,04
1954	301	1,20	8	0,03	18	0,07	606	2,42	932	3,68
1955	506	2,03	12	0,05	27	0,11	689	2,77	1234	4,90
1956	590	2,39	17	0,07	35	0,14	725	2,94	1366	5,47
1957	487	1,99	10	0,04	20	0,08	536	2,19	1054	4,26
1958	309	1,26	10	0,04	17	0,07	544	2,22	880	3,56
1959	648	2,64	17	0,07	32	0,13	866	3,53	1564	6,31
1960	617	2,57	22	0,09	41	0,17	814	3,39	1494	6,14
1961	318	1,34	7	0,03	14	0,06	595	2,51	934	3,91
1962	638	2,67	7	0,03	12	0,05	623	2,61	1280	5,34
1963	475	1,98	12	0,05	26	0,11	625	2,61	1138	4,69
1964	433	1,81	12	0,05	24	0,10	577	2,41	1046	4,32
1965	572	2,39	19	0,08	38	0,16	613	2,56	1242	5,11
1966	469	1,98	24	0,10	50	0,21	684	2,89	1225	5,07
1967	171	0,71	5	0,02	10	0,04	536	2,22	722	2,97
1968	951	3,93	24	0,10	48	0,20	785	3,24	1810	7,37
1969	359	1,50	10	0,04	19	0,08	552	2,30	940	3,88
1970	271	1,12	5	0,02	10	0,04	502	2,07	787	3,23
1971	732	3,01	17	0,07	36	0,15	772	3,17	1557	6,32
1972	827	3,46	22	0,09	43	0,18	791	3,31	1683	6,95
1973	397	1,79	18	0,08	38	0,17	519	2,34	971	4,29
1974	1105	4,95	31	0,14	65	0,29	893	4,00	2095	9,23
1975	340	1,56	9	0,04	17	0,08	479	2,20	846	3,84
1976	169	0,70	5	0,02	7	0,03	594	2,47	776	3,21
1977	247	1,01	2	0,01	7	0,03	514	2,10	771	3,13
1978	94	0,38	2	0,01	2	0,01	573	2,31	673	2,71
1979	260	1,04	7	0,03	15	0,06	546	2,19	828	3,29

Год	Приток с российской территории		Приток с китайской территории		Приток из оз. М. Ханка		Осадки		Суммарный приход	
	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>
1980	396	1,58	10	0,04	23	0,09	689	2,75	1118	4,41
1981	663	2,69	27	0,11	54	0,22	814	3,30	1805	6,21
1982	151	0,62	5	0,02	10	0,04	476	1,95	641	2,61
1983	335	1,36	7	0,03	12	0,05	774	3,14	1130	4,56
1984	366	1,49	5	0,02	10	0,04	524	2,13	904	3,66
1985	212	0,86	5	0,02	10	0,04	543	2,20	770	3,10
1986	469	1,89	5	0,02	10	0,04	534	2,15	1019	4,08
1987	466	1,88	22	0,09	45	0,18	609	2,46	1143	4,52
1988	246	0,99	5	0,02	12	0,05	539	2,17	801	3,20
1989	577	2,32	7	0,03	15	0,06	727	2,92	1325	5,30
1990	787	3,21	12	0,05	25	0,10	796	3,25	1620	6,56
1991	635	2,65	17	0,07	34	0,14	680	2,84	1366	5,63
1992	315	1,32	7	0,03	12	0,05	550	2,30	886	3,68
1993	380	1,56	10	0,04	17	0,07	587	2,41	994	4,05
1994	829	3,45	17	0,07	36	0,15	808	3,36	1690	6,95
1995	250	1,09	5	0,02	9	0,04	621	2,71	884	3,84
1996	306	1,28	5	0,02	10	0,04	487	2,04	808	3,36
1997	251	1,04	7	0,03	12	0,05	560	2,32	831	3,42
1998	352	1,44	10	0,04	17	0,07	635	2,60	1014	4,12
1999	382	1,56	5	0,02	10	0,04	479	1,95	876	3,55
2000	681	2,77	7	0,03	17	0,07	682	2,77	1388	5,60
2001	405	1,67	7	0,03	17	0,07	550	2,27	979	4,00
2002	498	2,06	12	0,05	24	0,10	762	3,15	1295	5,31
2003	248	1,04	2	0,01	7	0,03	476	1,99	733	3,05
2004	283	1,17	5	0,02	12	0,05	692	2,86	991	4,07
2005	434	1,79	7	0,03	15	0,06	598	2,47	1055	4,32
2006	371	1,53	10	0,04	17	0,07	663	2,73	1062	4,34
2007	596	2,48	10	0,04	19	0,08	734	3,05	1359	5,61
2008	335	1,40	10	0,04	19	0,08	622	2,60	986	4,08
2009	347	1,45	12	0,05	24	0,10	769	3,21	1151	4,76
2010	454	2,05	11	0,05	22	0,10	675	3,05	1162	5,20
2011	356	1,62	7	0,03	13	0,06	530	2,41	906	4,09
2012	583	2,49	2	0,01	7	0,03	710	3,03	1302	5,54
2013	660	3,05	13	0,06	26	0,12	734	3,39	1433	6,56
2014	317	1,50	11	0,05	21	0,10	582	2,75	931	4,35
2015	819	3,96	23	0,11	45	0,22	743	3,59	1630	7,77
1949-2015	446	1,87	10,8	0,05	21,7	0,09	632	2,64	1114	4,60

Ее межгодовая вариация весьма значительна. Так максимальное за весь расчетный период поступление воды в озеро наблюдалось в 1974 г. и составило 9,38 км<sup>3</sup>. При этом объем притока речных вод с российской части бассейна был равен 4,95 км<sup>3</sup> (52,8 %), а объем осадков составил 4,00 км<sup>3</sup> (42,6 %). В экстремальном маловодном

1982 г. приходная составляющая составила  $2,63 \text{ км}^3$ , в том числе осадки –  $1,95 \text{ км}^3$  (74,1 %) и приток российских рек –  $0,62 \text{ км}^3$  (23,6 %). Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что приходная часть водного баланса озера и в экстремальных по водности годам определяется осадками и притоком российских рек (рисунок 7.1).

Зависимость годовых изменений уровня от суммарного притока воды в озеро и осадков характеризуется за рассматриваемый период коэффициентом корреляции 0,90, что свидетельствует об их определяющей роли в многолетних изменениях уровня.

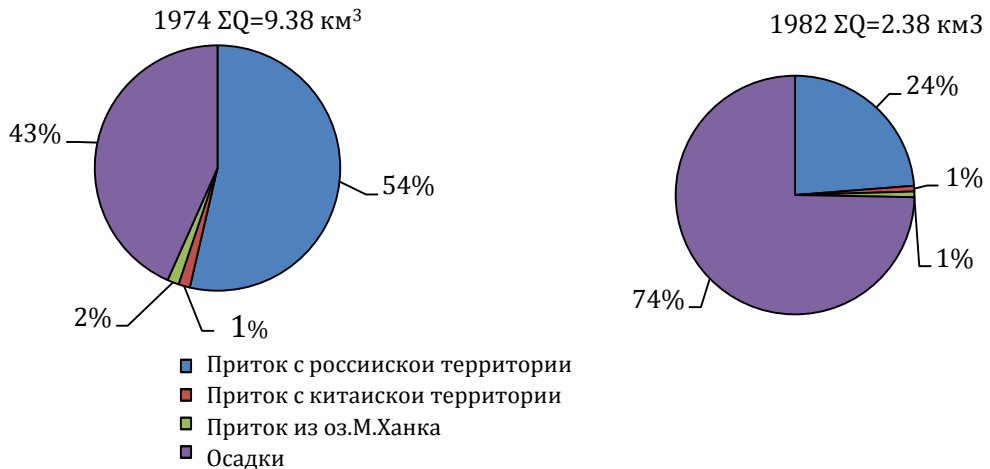


Рисунок 7.1 – Вклад отдельных составляющих водного баланса (%) в суммарное поступление воды в оз. Ханка за многоводный 1974 г. и маловодный 1982 г.

Расходные составляющие водного баланса представлены в таблице 7.2. Основной расходной составляющей является испарение с водной поверхности озера, средний многолетний объем которого равен  $2,78 \text{ км}^3$ . В первой половине рассматриваемого многолетнего периода в преобладающем числе лет испарение было выше средних многолетних значений, а во второй половине – ниже. Этот факт объясняется наличием значимого отрицательного тренда в многолетних изменениях испарения, причины которых были подробно рассмотрены в разделе 6.4.

Второй по величине расходной составляющей баланса является сток р. Сунгач, среднемноголетний объем которой составил  $1,54 \text{ км}^3/\text{год}$ . Величина годового стока реки определяется положением уровня озера и ее пропускной способностью в истоке (см. раздел 6.6). Наибольший объем стока р. Сунгач, равный  $2,51 \text{ км}^3$ , отмечался в 1975 г., а наименьший объем  $0,81 \text{ км}^3$  – в 2000 г.

Безвозвратное водопотребление (более 90% водозабора производится непосредственно из озера) значимую роль в расходной части водного баланса начало играть с 1960-х годов, к 1985 г. достигло  $0,38 \text{ км}^3$ , что является максимальным значением, к началу 2000-х годов снизилось до  $0,01\text{--}0,02 \text{ км}^3$ , и в настоящее время составляет  $0,13\text{--}0,16 \text{ км}^3$ .

## Расходные составляющие водного баланса оз. Ханка

Год	Испарение		Сток р. Сунгач		Безвозвратное водопотребление		Эпизодический сток из озера		Сток по водоотводящим каналам		Суммарный расход	
	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>
1949	779	3,21	434	1,79							1213	5,00
1950	764	3,11	373	1,52							1137	4,63
1951	783	3,19	372	1,51							1155	4,70
1952	784	3,18	336	1,36							1120	4,54
1953	755	3,03	275	1,11							1030	4,14
1954	675	2,69	219	0,87							894	3,57
1955	738	2,96	269	1,08							1007	4,04
1956	688	2,79	331	1,34			19,8	0,08			1039	4,21
1957	673	2,75	386	1,58							1059	4,32
1958	724	2,96	385	1,57			88,2	0,36			1198	4,89
1959	748	3,05	374	1,52							1122	4,57
1960	676	2,82	484	2,02	4,70	0,020					1164	4,85
1961	741	3,12	509	2,14	5,48	0,023					1255	5,29
1962	591	2,47	502	2,10	6,35	0,027					1099	4,60
1963	683	2,85	486	2,02	9,60	0,040	28,8	0,12			1207	5,03
1964	622	2,60	499	2,09	10,5	0,044					1132	4,73
1965	684	2,86	493	2,06	10,3	0,043	57,5	0,24			1245	5,20
1966	728	3,08	509	2,15	13,6	0,058	56,8	0,24			1307	5,52
1967	763	3,16	462	1,91	14,7	0,062	19,3	0,08			1259	5,22
1968	678	2,80	451	1,86	15,3	0,063	29,0	0,12			1173	4,85
1969	718	3,00	492	2,06	21,1	0,088					1232	5,14
1970	749	3,09	445	1,84	22,9	0,094					1217	5,03

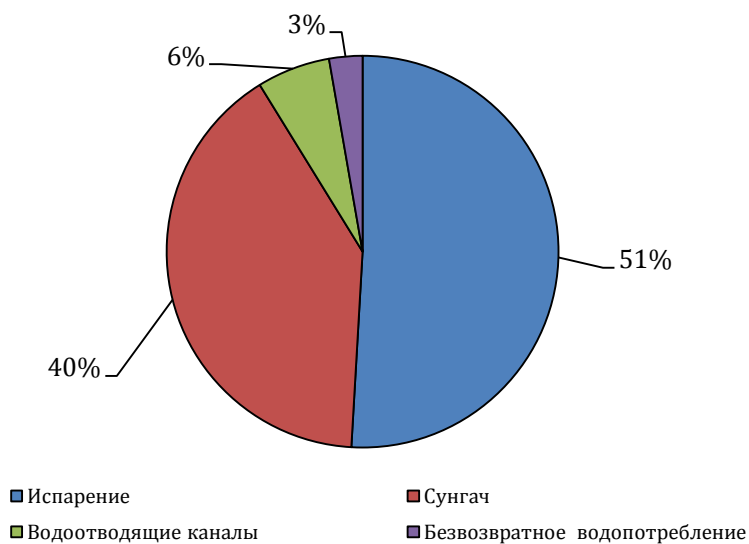
Год	Испарение		Сток р. Сунгач		Безвозвратное водопотребление		Эпизодический сток из озера		Сток по водоотводящим каналам		Суммарный расход	
	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>
1971	681	2,80	423	1,74	26,47	0,109	68,1	0,28			1198	4,93
1972	723	3,03	497	2,08	32,05	0,134					1253	5,24
1973	689	3,10	535	2,41	32,6	0,147			71,7	0,32	1328	5,98
1974	650	2,91	532	2,38	37,8	0,169	67,0	0,30	70,4	0,32	1357	6,08
1975	659	3,02	547	2,51	41,0	0,188			76,6	0,35	1324	6,07
1976	763	3,17	471	1,96	49,0	0,203			45,4	0,19	1328	5,52
1977	676	2,76	391	1,60	50,5	0,206			21,1	0,09	1139	4,65
1978	665	2,68	310	1,25	56,7	0,229					1032	4,17
1979	708	2,83	246	0,98	62,1	0,249					1016	4,07
1980	696	2,77	217	0,86	69,6	0,278					982	3,92
1981	587	2,38	350	1,42	69,2	0,281			8,79	0,04	1015	4,12
1982	708	2,90	405	1,66	70,7	0,290			25,2	0,10	1209	4,95
1983	650	2,64	355	1,44	77,4	0,314			9,95	0,04	1092	4,44
1984	607	2,47	369	1,50	80,8	0,329			14,3	0,06	1071	4,36
1985	663	2,68	331	1,34	95,0	0,385			3,32	0,01	1092	4,42
1986	676	2,72	226	0,91	70,7	0,285					973	3,92
1987	660	2,67	241	0,97	80,2	0,324					982	3,96
1988	674	2,72	231	0,93	68,2	0,275					973	3,92
1989	635	2,55	214	0,86	59,5	0,239					908	3,65
1990	619	2,52	306	1,25	61,6	0,251			17,5	0,07	1004	4,10
1991	597	2,49	410	1,71	50,4	0,210			50,7	0,21	1108	4,62
1992	650	2,72	419	1,75	56,6	0,237			54,0	0,23	1180	4,94
1993	630	2,59	345	1,42	65,1	0,268			30,1	0,12	1071	4,40
1994	603	2,51	318	1,32	48,4	0,202			22,6	0,09	992	4,13



Год	Испарение		Сток р. Сунгач		Безвозвратное водопотребление		Эпизодический сток из озера		Сток по водоотводящим каналам		Суммарный расход	
	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>
1995	647	2,82	364	1,59	28,5	0,124			40,2	0,18	1080	4,71
1996	645	2,70	323	1,35	20,4	0,085			29,1	0,12	1018	4,26
1997	622	2,58	286	1,19	18,0	0,074			18,0	0,07	944	3,91
1998	626	2,56	232	0,95	9,45	0,039			0,42	0,00	868	3,56
1999	662	2,70	216	0,88	18,7	0,076					897	3,66
2000	607	2,47	199	0,81	23,1	0,094					829	3,37
2001	595	2,45	258	1,06	27,0	0,111			9,13	0,04	889	3,66
2002	548	2,27	283	1,17	8,83	0,037			15,7	0,06	856	3,54
2003	657	2,75	332	1,39	12,3	0,052			31,1	0,13	1033	4,33
2004	678	2,81	283	1,17	2,85	0,012			16,7	0,07	980	4,06
2005	621	2,56	264	1,09	4,07	0,017			10,9	0,04	899	3,71
2006	589	2,43	262	1,08	5,43	0,022			10,3	0,04	867	3,57
2007	584	2,43	301	1,25	5,39	0,022			22,1	0,09	913	3,79
2008	643	2,69	325	1,36	16,8	0,070			29,4	0,12	1014	4,24
2009	558	2,33	322	1,34	41,4	0,173			28,5	0,12	949	3,97
2010	509	2,30	386	1,74	44,4	0,200			48,4	0,22	988	4,46
2011	602	2,74	393	1,79	43,6	0,198			50,7	0,23	1090	4,95
2012	647	2,76	344	1,47	48,2	0,206			35,5	0,15	1075	4,59
2013	621	2,87	413	1,91	33,6	0,155			55,8	0,26	1123	5,19
2014	707	3,35	444	2,10	32,2	0,153			64,2	0,30	1247	5,90
2015	612	2,96	489	2,36	26,3	0,127			74,5	0,36	1201	5,81
1949-2015	666	2,78	365,60	1,54	36,0	0,15	19,8	0,08			1084	4,54

После создания Сунгачинского канала, начиная с 1973 г., при положении уровня озера выше отметки 68,5 м БС77 по нему происходит сток из озера, а с 2000–х годов дополнительно еще и по каналу без названия (см. раздел 6.7). Максимальных значений (0,30–0,36 км<sup>3</sup>) сток по водоотводящим каналам достиг в 2014–2015 гг.

Эпизодический поверхностный сток из озера может играть значимую роль в расходной части только в отдельные годы при высоком положении уровня озера и значительном ветровом нагоне, во время которого вода заполняет низменности на восточном побережье. Современное распределение суммарного расхода воды из озера по отдельным составляющим представлено на *рисунке 7.2*.



*Рисунок 7.2* – Современное распределение суммарного расхода воды из оз. Ханка по отдельным составляющим (%)

В *таблице 7.3* приведены погодичные данные о фактических годовых изменениях уровня оз. Ханка, о суммарном поступлении воды в озеро, суммарных расходах воды, расчетных изменениях уровня и невязках водного баланса.

Таблица 7.3

## Водный баланс оз. Ханка

Год	Изменение уровня, см	Суммарный приход		Суммарный расход		Результующая баланса		Невяка см
		см	км <sup>3</sup>	см	км <sup>3</sup>	см	см	
1949	-41	80,8	3,33	121,3	5,00	-40	1	
1950	-12	110,1	4,48	113,7	4,63	-4	8	
1951	23	133,9	5,45	115,5	4,70	18	-5	
1952	-49	79,1	3,20	112,0	4,54	-33	16	
1953	-32	76,3	3,07	103,0	4,14	-27	5	
1954	2	93,2	3,72	89,4	3,57	4	2	
1955	28	123,4	4,96	100,7	4,04	23	-5	
1956	41	136,7	5,54	103,9	4,21	33	-8	
1957	9	105,3	4,30	105,9	4,32	-1	-10	
1958	-27	88,0	3,59	119,8	4,89	-32	-5	
1959	48	156,3	6,37	112,2	4,57	44	-4	
1960	49	149,3	6,22	116,4	4,85	33	-16	
1961	-31	93,4	3,94	125,5	5,29	-32	-1	
1962	14	128,0	5,36	109,9	4,60	18	4	
1963	-3	113,8	4,75	120,7	5,03	-7	-4	
1964	-6	104,5	4,37	113,2	4,73	-9	-3	
1965	8	124,3	5,19	124,5	5,20	0	-8	
1966	-2	122,6	5,18	130,7	5,52	-8	-6	
1967	-46	72,2	2,99	125,9	5,22	-54	-8	
1968	58	180,8	7,47	117,3	4,85	64	6	
1969	-28	94,0	3,92	123,2	5,14	-29	-1	

Год	Изменение уровня, см	Суммарный приход		Суммарный расход		Результирующая баланса	Невка
		см	км <sup>3</sup>	см	км <sup>3</sup>		
1970	-33	78,8	3,25	121,7	5,03	-43	см -10
1971	43	155,8	6,40	119,8	4,93	36	-7
1972	46	168,2	7,04	125,3	5,24	43	-3
1973	-32	97,2	4,38	132,8	5,98	-36	-4
1974	61	209,4	9,38	135,7	6,08	74	13
1975	-60	84,5	3,88	132,4	6,07	-48	12
1976	-51	77,5	3,22	132,8	5,52	-55	-4
1977	-30	77,1	3,15	113,9	4,65	-37	-7
1978	-40	67,2	2,71	103,2	4,17	-36	4
1979	-21	82,8	3,32	101,6	4,07	-19	2
1980	11	111,8	4,46	98,2	3,92	14	3
1981	91	155,8	6,32	101,5	4,12	79	-12
1982	-51	64,2	2,63	120,9	4,95	-57	-6
1983	18	112,9	4,58	109,2	4,44	4	-14
1984	-10	90,5	3,68	107,1	4,36	-17	-7
1985	-20	77,0	3,12	109,2	4,42	-32	-12
1986	-1	101,8	4,10	97,3	3,92	5	6
1987	11	114,1	4,61	98,2	3,96	16	5
1988	-25	80,2	3,23	97,3	3,92	-17	8
1989	26	132,6	5,33	90,8	3,65	42	16
1990	58	162,0	6,61	100,4	4,10	62	4
1991	42	136,6	5,70	110,8	4,62	26	-16
1992	-37	88,5	3,70	118,0	4,94	-29	8
1993	-14	99,3	4,08	107,1	4,40	-8	6

Год	Изменение уровня, см	Суммарный приход		Суммарный расход		Результирующая баланса	Невка
		см	км <sup>3</sup>	см	км <sup>3</sup>		
1994	69	169,0	7,03	99,2	4,13	70	см 1
1995	-33	88,4	3,86	108,0	4,71	-20	13
1996	-9	80,7	3,38	101,8	4,26	-21	-12
1997	-31	83,0	3,44	94,4	3,91	-11	20
1998	-6	101,3	4,15	86,8	3,56	15	21
1999	-44	87,6	3,57	89,7	3,66	-2	42
2000	50	138,8	5,64	82,9	3,37	56	6
2001	-10	98,0	4,04	88,9	3,66	9	19
2002	67	129,6	5,36	85,6	3,54	44	-23
2003	-38	73,4	3,07	103,3	4,33	-30	8
2004	-16	99,2	4,10	98,0	4,06	1	17
2005	-2	105,4	4,35	89,9	3,71	16	18
2006	2	106,1	4,37	86,7	3,57	20	18
2007	30	135,9	5,65	91,3	3,79	45	15
2008	-2	98,5	4,12	101,4	4,24	-3	-1
2009	15	115,2	4,81	94,9	3,97	20	5
2010	40	116,2	5,25	98,8	4,46	17	-23
2011	-24	90,6	4,12	109,0	4,95	-18	6
2012	1	130,2	5,56	107,5	4,59	23	22
2013	49	143,3	6,62	112,3	5,19	31	-18
2014	-10	93,1	4,40	124,7	5,90	-32	-22
2015	35	163,0	7,88	120,1	5,81	43	8
1949-2015	1,76	111,0	4,64	108,4	4,54	0,26	-1,50

Как следует из представленных данных, годовые изменения уровня достаточно хорошо объясняются соотношением приходных и расходных составляющих водного баланса оз. Ханка. Об этом свидетельствует график связи фактических годовых приращений уровня с годовыми приращениями, рассчитанными по уравнению водного баланса озера (рисунок 7.3), характеризующийся коэффициентом корреляции 0,98 за период 1949–1996 гг. Аналогичная зависимость, построенная за период 1997–2015 гг. (рисунок 7.4), имеет коэффициент корреляции 0,83, что указывает на понижение тесноты связи указанных характеристик. Причины этого рассматриваются в следующем подразделе.

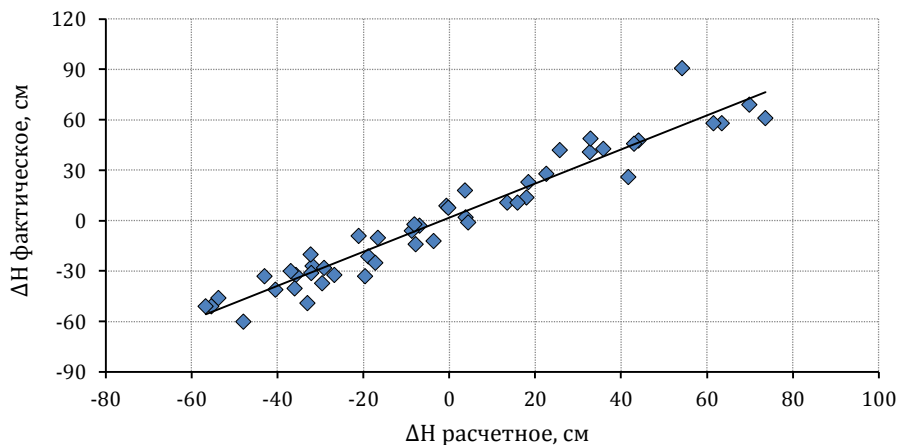


Рисунок 7.3 – График связи фактических и расчетных годовых приращений уровня за период 1949–1996 гг.

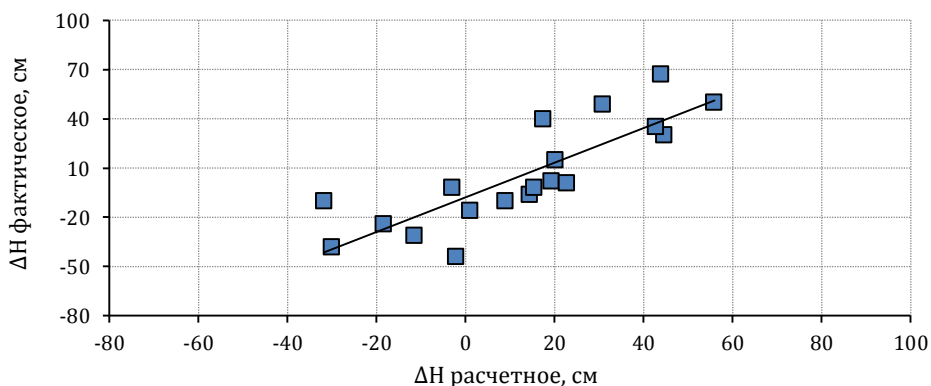


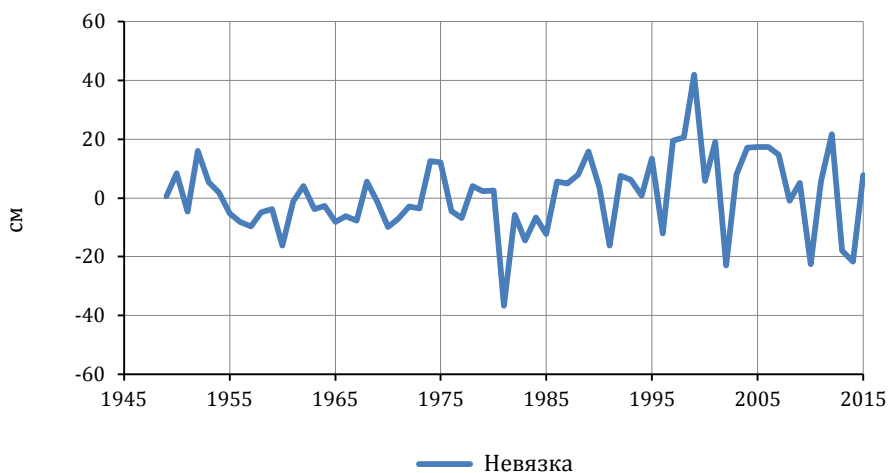
Рисунок 7.4 – График связи фактических и расчетных годовых приращений уровня за период 1997–2015 гг.

## 7.2 Оценка точности (погрешности) составления водного баланса

Невязки являются объективным показателем точности (погрешности) составленного водного баланса озера. На *рисунке 7.5* показан хронологический график годовых невязок баланса за исследуемый многолетний период времени. Анализ этих данных позволяет сделать вывод о том, что до второй половины 1990-х годов годовые невязки водного баланса не содержат систематических составляющих, хотя в отдельные годы невязки могут быть значительными и достигать 16–17 см, что обусловлено объективными погрешностями расчета водного баланса, однако при увеличении периода осреднения их значения существенно уменьшаются.

На *рисунке 7.6* проведена кривая распределения вероятностей годовых величин невязок водного баланса за период 1949–1996 гг., из которого следует, что распределение является нормальным со средним значением близким к нулю и средним квадратическим отклонением, равным 1,6 см.

Однако примерно с 1998 г. наблюдается значительное увеличение погрешности расчета водного баланса. Для анализа погрешностей водного баланса озера необходимо также оценить допускаемую погрешность его расчета. Все составляющие водного баланса измеряются или рассчитываются с различной погрешностью, при этом невязка баланса компенсирует погрешности определения учтенных элементов и все неучтенные составляющие баланса. Поэтому при интерпретировании результатов составления балансов важной задачей является выявление вклада каждого элемента в невязку или остаточный член детального уравнения водного баланса. Именно этим определяется необходимость анализа источников погрешностей расчета баланса и способов их количественной и качественной оценки.



*Рисунок 7.5* – Хронологический график годовых невязок баланса за многолетний период

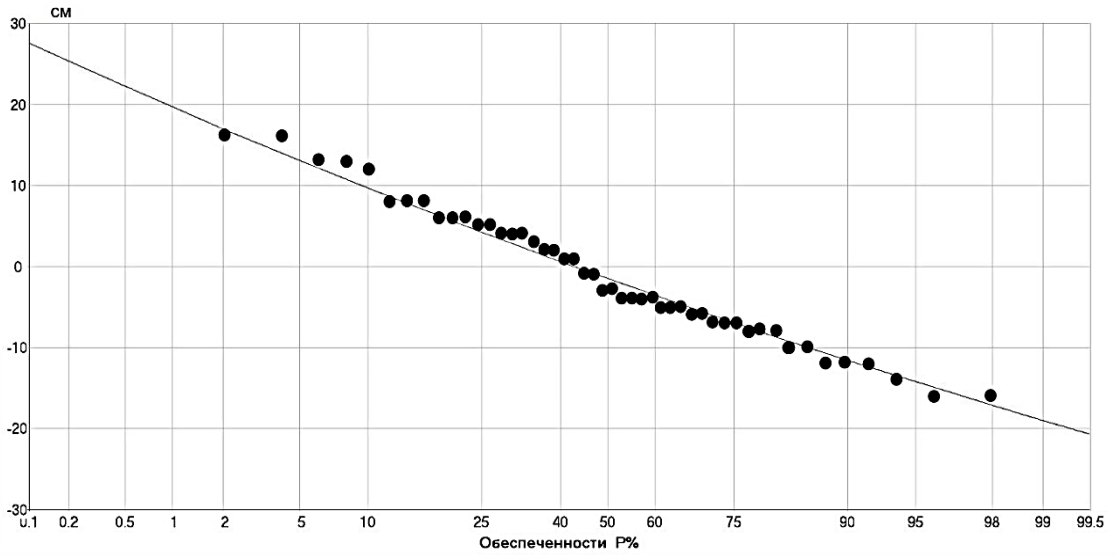


Рисунок 7.6 – Кривая распределения вероятностей годовых величин невязок водного баланса за период 1949–1996 гг.

При оценке точности составления водного баланса озера будем опираться на методические подходы, которые используются при оценке невязок русловых водных балансов [82]. Согласно теории оценки случайных погрешностей, результирующая погрешность расчета водного баланса определяется методом частных погрешностей, т. е. оценивается совокупной погрешностью расчета его элементов, вычисляемой как корень квадратный из суммы квадратов средних квадратических погрешностей определения всех составляющих уравнения водного баланса:

$$\sigma_o = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} \sigma_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} (\delta_i Q_i)^2}, \quad (7.4)$$

где  $N$  – число элементов РВБ;  $i$  – порядковый номер элемента;  $\sigma_o, \sigma_i$  – средние квадратические погрешности определения соответственно остаточного члена (невязки) баланса и его отдельных составляющих;  $Q_i$  – относительная средняя квадратическая погрешность определения  $i$ -го элемента баланса.

Результаты расчета водного баланса можно считать надежными, если абсолютная величина невязки баланса значимо отличается от предельной погрешности его определения. Допустимая невязка баланса зависит от доверительной вероятности оценки надежности водного баланса. Для доверительной вероятности  $p = 95\%$  значения невязки водного баланса ( $H_{6\sigma}$ ) должны находиться в интервале:

$$-1,96 \leq H_{6\sigma} \leq 1,96 \quad (7.5)$$



Для расчета погрешности расчета водного баланса необходимо оценить случайные средние квадратические погрешности расчета каждого его элемента. Погрешность расчета притока в озера вычислена по методу суммирования частных погрешностей расчета средних годовых расходов в замыкающих створах. Принятые для расчета случайные погрешности приведены в *таблице 7.4*.

*Таблица 7.4*

Относительные случайные погрешности расчета средних годовых расходов воды ( $\sigma Q_i$ ) на гидрологических постах

№ п.п.	Река-пункт	Период расчета	Случайная погрешность, %	Примечания
1	р. Спасовка (Сантахеза) – с. Гайворон	1949-1959	3,0	По наблюдениям
		1960-2015	3,0	Сток восстановлен
2	р. Илистая – с. Халкидон	1949-2015	3,0	По наблюдениям
3	р. Черниговка – с. Черниговка (ж.д.мост)	1949-1997	3,0	По наблюдениям
		1998-2015	6,2	Сток восстановлен
4	р. Мельгуновка – пос. Луговой	1949-1995	3,0	По наблюдениям
		1996-2015	3,0	Сток восстановлен
5	р. Комиссаровка – с. Ильинка	1949-2015	3,0	По наблюдениям
6	р. Большие Усачи – с. Первомайское	1949-1959	9,0	Сток восстановлен
		1960-1991	3,0	По наблюдениям
		1992-2015	9,0	Сток восстановлен
7	Сток с неизученной территории	1949-2015	25,0	Сток рассчитан

Для периодов, когда сток определен по данным инструментальных наблюдений, погрешность расчета среднегодового расхода принята равной 3 % для периодов, когда сток был восстановлен по методу гидрологической аналогии, погрешности получены по данным расчета, для стока с неизученной территории погрешность расчета принята равной 25 % в соответствии с рекомендациями методических указаний [82].

Для остальных элементов водного баланса приняты следующие значения относительных погрешностей их расчета: осадки – 5 %, испарение 12,5 %. Сток с территории Китая и из озера Малая Ханка – 25 %, безвозвратное потребление и безвозвратные потери – 25 %, потери при переливе на пойму во время нагонов – 50 %, сток по водоотводящим каналам за период с 1974 по 2014 гг. – 50 %, за 2015 г. – 10 %.

Суммарная и допустимая с вероятностью не превышения 95 % погрешности расчета невязки рассчитаны *по формулам 7.4 и 7.5*.

Результаты расчета приведены на *рисунке 7.7*. Как видно из графика, начиная с 1998 г. в отдельные годы невязки водного баланса стали превышать предельно

допустимые значения. Что, по нашему мнению, указывает на наличие неучтенных в этот период статей водного баланса. Это, прежде всего, относится к полному отсутствию количественных сведений об осуществляемых китайской стороной регулируемых сбросах из оз. М. Ханка. Так же, следует отметить, что со второй половины 1990-х гг. ухудшился и учет притока в озеро с российской территории.



Рисунок 7.7 – Невязки водного баланса озера Ханка

Так, в 1996 г., 1998 г. закрылись гидрологические посты, учитывавшие сток на реках Мельгуновка и Черниговка и в дальнейшем сток по этим рекам был восстановлен расчетным способом. На действующих гидрологических постах качество учета стока тоже ухудшилось из-за сокращения количества инструментально измеренных расходов воды.

### 7.3 Анализ зависимостей элементов водного баланса от метеорологических факторов

Полученные в предыдущих разделах погодичные данные об основных элементах водного баланса оз. Ханка и осадках, выпадающих в его бассейне, за период 1949–2015 гг. позволяют установить ряд важных для понимания причин и физических механизмов межгодовой изменчивости уровня водоема и его резких изменений за относительно короткие периоды, а также для разработки методов его прогнозирования.

На *рисунках 7.8 и 7.9* представлены графики, характеризующие зависимости суммарного притока речных вод в озеро и годовых изменений его уровня от годовой суммы осадков, выпадающих в бассейне водоема.

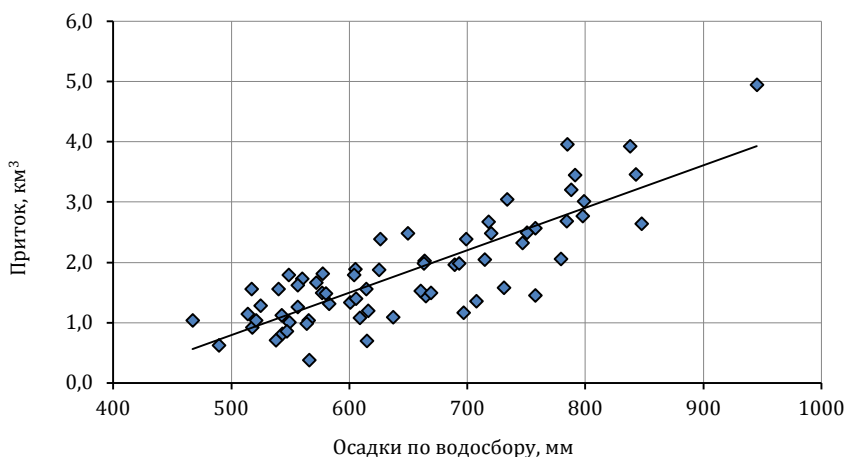


Рисунок 7.8 – Зависимость суммарного притока речных вод в озеро от годовых сумм осадков, выпадающих на его водосбор

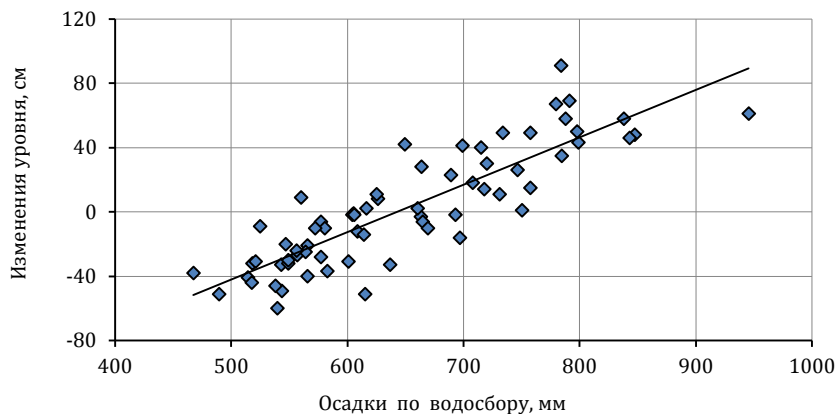


Рисунок 7.9 – Зависимость годовых изменений уровня озера от годовых сумм осадков, выпадающих на его водосбор

Годовые суммы осадков, выпадающих на водосбор озера, были определены по данным наблюдений на 12 метеорологических станциях. Из этих данных следует определяющая роль общей увлажненности бассейна при формировании приходной составляющей водного баланса озера и, в конечном итоге, изменений его уровня.

Коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту этих зависимостей, составляют, соответственно, 0,87 и 0,86. Наличием таких достаточно тесных зависимостей и объясняется факт синфазности в многолетних колебаниях изменений уровня, притока и осадков.

Зависимость годовых изменений уровня оз. Ханка от испарения выражена слабо (рисунок 7.10) и характеризуется коэффициентов корреляции -0,49. Вместе с тем следует отметить, что он является значимым.

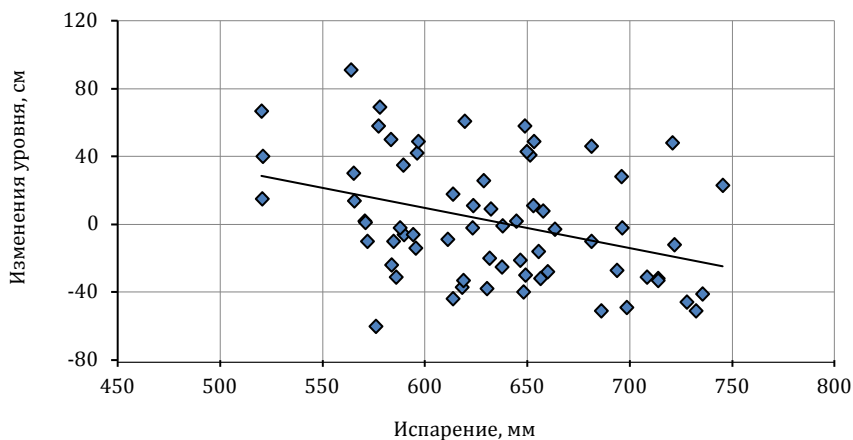


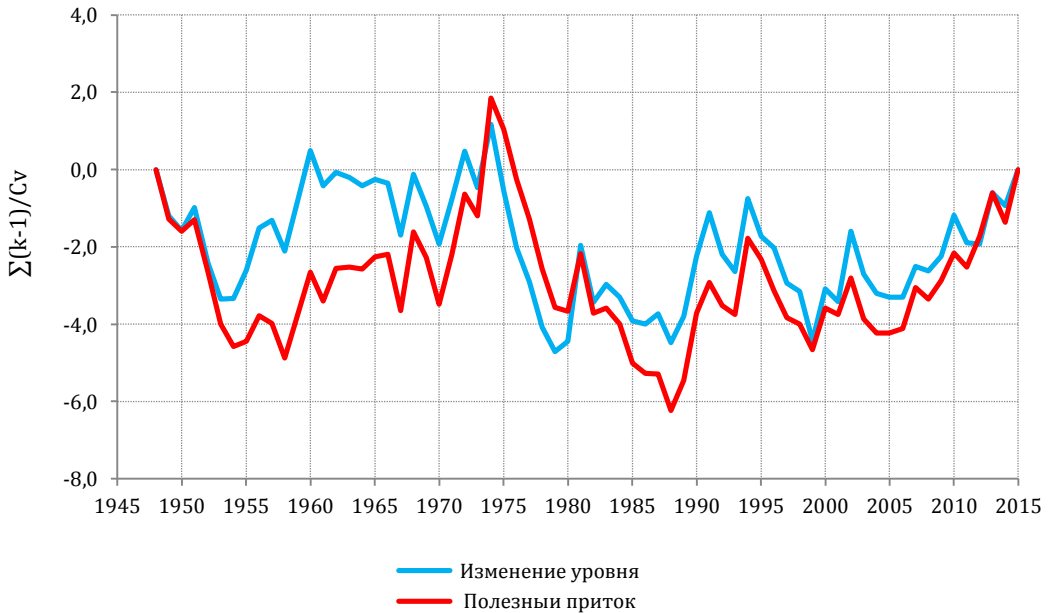
Рисунок 7.10 – Зависимость годовых изменений уровня озера от испарения с его поверхности

Исходя из наличия такой отрицательной связи можно предположить, что в периоды высокой увлажненности бассейна озера более вероятны пониженные значения испарения, а в «сухие» периоды – наоборот. Наличие таких механизмов должно приводить к увеличению амплитуды многолетних колебаний уровня, а также к повышению вероятности его резких изменений. Как было показано в разделе 6.4 среди множества факторов, определяющих величину и изменчивость испарения, можно выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние – влажность воздуха (дефицит влажности воздуха) над водной поверхностью, скорость ветра на акватории водоема и температура поверхностного слоя воды. Вклад трендовой составляющей скорости ветра в изменение величины испарения наибольший среди других рассмотренных факторов.

Приток речных вод к оз. Ханка следует рассматривать как функцию комплекса естественных гидрометеорологических факторов, действующих в пределах его водосбора, поскольку влиянием безвозвратного водопотребления на сток рек бассейна вполне можно пренебречь, так как оно составляет менее 1 % от его нормы. Видимое испарение (разность между испарением с поверхности водоема и осадками) также является результирующей величиной естественных процессов тепло-влагообмена на поверхности озера. Их соотношение, а также речной приток, прежде всего, определяют многолетние изменения уровня озера, фазы его повышения и понижения.

Совместное влияние естественных гидрометеорологических факторов на уровень оз. Ханка можно объективно качественно оценить путем совместного анализа многолетних изменений годовых значений «полезного притока» в озеро («полезный приток» – сумма притока речных вод и осадков на поверхность озера за вычетом испарения с его акватории) и годовых приращений уровня озера.

На *рисунке 7.11* приведены разностные интегральные кривые «полезного притока» к озеру и годовых изменений его уровня за 1949–2015 гг. Практически полная синхронность колебаний этих кривых позволяет прийти к выводу о том, что многолетние изменения уровня оз. Ханка, в том числе его современное повышение, определяются, главным образом, изменениями «полезного притока» в озеро.



*Рисунок 7.11* – Разностные интегральные кривые годовых изменений уровня и «полезного притока»

На *рисунке 7.12* приведены зависимости годовых приращений уровня озера от «полезного притока» за различные многолетние периоды.

Анализ приведенных зависимостей дает основание сделать вывод о том, что основной причиной изменений уровня оз. Ханка является значительные вариации «полезного притока».

Обращает на себя внимание факт уменьшения тесноты связи рассматриваемых переменных в период с 1997–2015 гг., что может объясняться отсутствием данных по стоку из оз. Малая Ханка через ГТС, которые несомненно имеет место в эти годы, а также пониженной точности расчетов притока речных вод в озеро.

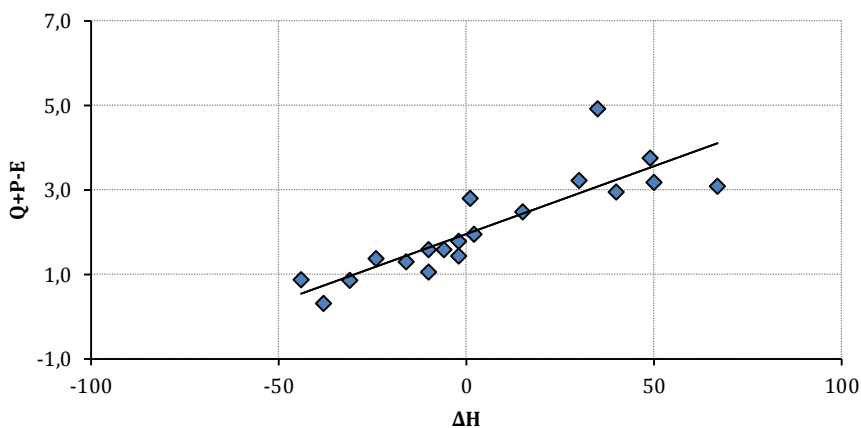
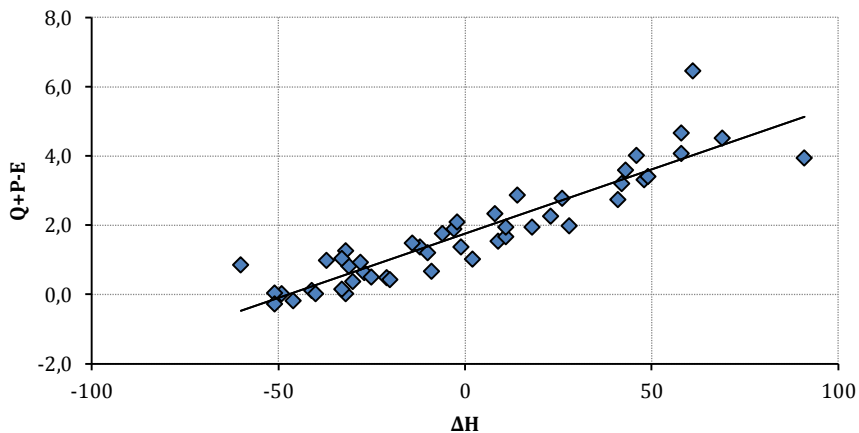


Рисунок 7.12 – Зависимости годовых приращений уровня озера от «полезного притока» за различные многолетние периоды: а) за 1949–1996 гг.; б) за 1997–2015 гг.

Рассмотрим составляющие водного баланса за период 2000–2016 гг., в течение которого уровень озера повысился от отметки 68,01 м на 1 января 2000 г. до отметки 69,88 м на 1 января 2016 г., то есть на 187 см. При этом средний годовой уровень в 2000 г. был равен 68,21 м, а в 2015 г. – 69,78 м.

Суммарный приток в озеро за этот период, включая речной приток с российской и китайской частей водосбора, а также естественный сток из оз. Малая Ханка, составил 2,12 км<sup>3</sup>/год, что на 6 % больше среднего многолетнего значения.

Годовые суммы осадков на акваторию озера были выше среднего многолетнего значения на 2,6 см в год (4,1 %), а слой испарения с водной поверхности уменьшился на 5,5 см (8,2 %). В результате за рассматриваемый период слой осадков

превышает испарение на 4,7 см, в то время как в среднем за 1949–2015 гг. испарение превышало осадки на 3,4 см.

Таким образом, увеличение притока к озеру и количества осадков на его поверхность, соответственно, на 6,0 % и 4,1 % по сравнению с их нормами, и снижение испарения на 8,2 % явились главной причиной современного повышения уровня оз. Ханка.

Рассматривая современное повышение уровня оз. Ханка, следует отметить, что наиболее интенсивная его фаза относится к 2006–2015 гг., в течение которых уровень возрос на 136 см. В связи с этим необходимо отдельно рассмотреть особенности водного баланса озера за этот период.

В среднем за 2006–2015 гг. приток в озеро составил 2,29 км<sup>3</sup> в год, что на 14,5 % превысило норму, слой осадков на его поверхность составил 676 мм и на 6,6 % был выше среднего многолетнего, а испарение составило 607 мм и на 8,9 % было меньше нормы. Результирующая водообмена на поверхности озера (видимое испарение) была положительной и составила 6,9 см. Такое соотношение основных элементов водного баланса, формирующихся под влиянием естественных гидрометеорологических факторов, обусловило значительное превышение его приходной части над расходной, и, как следствие, резкое повышение уровня.

Наряду с естественными факторами на изменение уровня оз. Ханка оказывают и антропогенные. Оценка вклада естественных и антропогенных факторов рассматривается в следующем подразделе.

#### 7.4 Влияние хозяйственной деятельности в бассейне озера на многолетнюю динамику его уровня

При разработке водного баланса оз. Ханка учтены антропогенные факторы, могущие в той или иной мере оказывать влияние на изменение его уровня:

- безвозвратное водопотребление;
- сток из озера по искусственным водоотводящим каналам;
- уменьшение пропускной способности р. Сунгач в результате прекращения расчисток бара в ее истоке;
- дополнительный приток из оз. Малая Ханка в результате переброски части стока р. Мулинхэ.

Безвозвратное водопотребление определяется, главным образом, непосредственными водозаборами из озера для удовлетворения потребностей орошаемого земледелия с последующим сбросом в водоем или дренируемые им водотоки.

С первой половины 1970-х годов после сооружения Сунгачинского канала из озера начал осуществляться дополнительный сток, а в 2000-е годы дополнительно еще сток по каналу без названия.

В последние десятилетия, в результате уменьшения пропускной способности р. Сунгач в ее истоке, отмечается процесс снижения стока реки. Поскольку уменьшение пропускной способности, наиболее вероятно, было вызвано прекращением расчисток на баре, расположенном в истоке реки, то с известной долей условности этот фактор отнесен к антропогенным. В разделе 6.8 показано, что в период современного повышения озера в него из оз. М. Ханка производились сбросы воды через систему гидротехнических сооружений. Ввиду отсутствия каких-либо количественных данных о сбросах воды в оз. Ханка из оз. М. Ханка, осуществляемых китайской стороной эта антропогенная составляющая водного баланса при оценке ее вклада в современное повышение уровня, была оценена очень приближенно на основании результатов модельных расчетов.

Совокупное воздействие естественных и антропогенных факторов на уровенный режим озера можно проследить на основе анализа зависимостей годовых изменений уровня от результирующего водного баланса. За период 1949–2015 гг. зависимость характеризуется коэффициентом корреляции 0,93. Наиболее тесная связь с коэффициентом корреляции 0,97 отмечается за период 1949–1996 гг. В последующий период (1997–2015 гг.) теснота связи существенно меньше ( $r = 0,83$ ), что может свидетельствовать о неполном учете антропогенных факторов, оказывающих влияние на водный баланс озера. Оценка вклада естественных и антропогенных факторов в современное повышение уровня оз. Ханка представляет самостоятельную научную задачу.

Поскольку, в общем случае, уравнение водного баланса озера относится к классу стохастических нелинейных уравнений, то для решения поставленной задачи было выполнено имитационное моделирование, где в качестве модели колебания уровня использовано уравнение водного баланса. Имитационные расчеты выполнялись методом последовательных итераций по *уравнениям 7.1–7.3* за период 2000–2015 гг.

За начальный принимали фактический уровень на 1 января 2000 г. равный 68,01 м БС77. Конечный расчетный уровень определялся на 1 января 2016 г. Моделировались траектории уровня озера при различных вариантах задания элементов водного баланса озера и их соотношениях.

### 7.5 Оценка вклада гидрометеорологических и антропогенных факторов в современное повышение уровня озера

В результате анализа результатов сценарных расчетов оценен вклад естественных гидрометеорологических и антропогенных факторов в современное повышение уровня оз. Ханка (*таблица 7.5*).

Основываясь на результатах анализа водного баланса оз. Ханка за период его современного повышения и результатах имитационного моделирования, можем сделать следующие выводы.



Основной вклад в современное повышение уровня озера принадлежит естественным гидрометеорологическим факторам, в качестве которых рассматриваются суммарный приток в водоем, осадки на его поверхность и испарение с акватории. Их совокупное влияние на общий подъем уровня (187 см) оценивается в 153 см (82 %), в том числе за счет увеличения притока 20 см (11 %), осадков 43 см (23 %) и снижения испарения 90 см (48 %).

Таблица 7.5

Вклад естественных гидрометеорологических и антропогенных факторов в изменение уровня оз. Ханка в период с 1 января 2000 г. по 1 января 2016 г.

№ п/п	Факторы	Вклад факторов в изменение уровня	
		см	%
1	Суммарный приток в озеро, осадки на поверхность и испарение, в том числе:	153	82
	суммарный приток в озеро	20	11
	осадки на поверхность озера	43	23
	испарение	90	48
2	Сток в водоотводящие каналы	- 24	- 13
3	Безвозвратное водопотребление	- 11	- 6
4	Снижение стока р. Сунгач в результате уменьшения ее пропускной способности в истоке	35	19
5	Поступление воды из оз. М. Ханка в результате переброски части стока р. Мулинхэ.	34	18
		Σ 187	Σ 100

Влияние антропогенных факторов имеет разнонаправленный характер. Так вклад безвозвратного водопотребления в изменение уровней в 2000–2016 гг. составляет -11 см. Влияние дополнительного стока по водоотводящим каналам оценено в -24 см. В свою очередь, в результате снижения пропускной способности р. Сунгач дополнительное повышение уровня озера составило 35 см, а за счет дополнительного поступления воды из оз. М. Ханка уровень повысился на 34 см. В итоге общий вклад антропогенных факторов в современное повышение уровня равен 34 см, что составляет 18 %.

## 8. Сценарии гидрометеорологических условий и развитие водохозяйственной деятельности в бассейне озера

### 8.1 Сценарии гидрометеорологических условий на ближайшие 30 лет

#### 8.1.1 Сценарии изменения приземной температуры воздуха и осадков в бассейне озера

В настоящее время гидродинамические модели являются безальтернативным источником данных для получения оценок температуры воздуха и осадков на длительную перспективу.

Исчерпывающий обзор результатов расчетов по гидродинамическим моделям последнего поколения СМIP5 применительно к различным регионам России дан в работах [83], [84]. В современной климатологии их принято называть проекциями, поскольку в отличие от прогнозов изначально не предполагается, что они с большой вероятностью реализуются в будущем. Проекция представляет собой различные траектории развития климатической системы, расчет которых выполнен в соответствии с заданными условиями изменения климатообразующих факторов, прежде всего концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере. Заданные условия, в свою очередь, принято называть сценариями. Несмотря на значительное улучшение качества современных моделей СМIP5 по сравнению с предшествующим поколением моделей СМIP3, неопределенность климатических проекций остается высокой, в особенности если рассматривается относительно небольшой конкретный регион [85]. Дальнейшее совершенствование моделей может несколько уменьшить неопределенность проекций, связанную с межмодельными различиями. Принципиальное и неустранимое ограничение – отсутствие точных оценок антропогенной эмиссии ПГ, по которым рассчитывается воздействие на климат.

В настоящее время разработаны и широко используются четыре сценария эмиссии ПГ: RCP8.5 [86], RCP6 [87], RCP4.5 [88] и RCP2.6 [89]. Аббревиатура RCP (Representative Climate Pathway) указывает на то, что в основу положены разные модели глобального экономического развития, последующие цифры указывают итоговую величину радиационного воздействия к 2100 г., т.е. обусловленные эмиссиями ПГ увеличение глобального радиационного баланса ( $\text{Вт/м}^2$ ). В практическом плане сценарий RCP2.6 не представляет интереса, поскольку он был разработан с тем, чтобы изучить картину гипотетического мира, в котором уже сейчас значительно сокращены эмиссии парниковых газов. Оказалось, что даже в этом случае глобальная температура к середине XXI в. повысилась бы на  $1^\circ\text{C}$  с последующей стабилизацией. Три другие сценария к середине XXI в. дают глобальное потепление на  $1,4^\circ\text{C}$ ,  $1,3^\circ\text{C}$  и  $2,0^\circ\text{C}$  соответственно и последующее увеличение на  $1,8^\circ\text{C}$ ,  $2,2^\circ\text{C}$  и  $3,7^\circ\text{C}$  до конца XXI в. [90]. Если же оценивать изменение климата до 2030 г., то различия

глобальной температуры, рассчитанной по любой модели для всех сценариев RCP, не превышают  $0,2^{\circ}\text{C}$ , что в 2 раза меньше межмодельного разброса, который для каждого из RCP составляет около  $0,4^{\circ}\text{C}$  [91]. По этой причине в настоящем разделе рассматриваются результаты, полученные по наиболее агрессивному сценарию RCP8.5.

Широкое распространение получил ансамблевый метод, состоящий в том, что расчеты по большому числу моделей усредняются и случайные ошибки компенсируются. Считается, что чем больше моделей входит в ансамбль, тем более точен результат. Однако в ряде работ [83], [92] была показана целесообразность проводить тестирование и исключать модели с большой ошибкой. Притом, что преимущества ансамблевого осреднения не вызывают сомнений, вопрос об отборе моделей для включения в ансамбль оставался открытым. Нами был разработан необходимый для этого метод, который был опубликован в работах [84], [93]. В соответствии, с этим методом была построена оптимизированная для района оз. Ханка ансамблевая климатическая проекция. Для этого были осуществлены следующие последовательные действия.

Из полного набора расчетов по 49 современным гидродинамическим моделям семейства CMIP5 были выбраны 30 моделей, в которых представлены температуры воздуха и осадки за исторический период до 2005 года. Результаты расчетов были интерполированы в единую пространственную сетку, в ней выделены узлы в районе, окружающем оз. Ханка.

Был выбран временной период для сравнения расчетов и наблюдений на основе представлений об эпохах, характеризуемых общностью статистических характеристик климата [84], [93]. В районе оз. Ханка началом современной климатической эпохи можно считать середину 1970-х годов. Приняв это во внимание, а также исходя из временных границ исторических расчетов по моделям CMIP5, выбрали для сравнения период 1976–2005 гг.

Было проведено сравнение регионально осредненных результатов расчетов температуры воздуха и осадков по моделям CMIP5 с данными наблюдений на метеостанциях. Сравнивались тренды рассматриваемых характеристик, которые позволяют судить о том, как модели воспроизводят современные изменения.

Был проведен анализ результатов тестирования моделей и сформирован оптимальный ансамбль на основе лучших из них. Рассчитывалась относительная ошибка, определяемая как разность модельного и наблюдаемого трендов деленная на наблюдаемый тренд, взятая по абсолютной величине.

Климатические модели по-разному воспроизводят наблюдавшиеся изменения температуры и осадков в районе оз. Ханка. Для прогноза на будущее наиболее показательны результаты воспроизведения изменений за период 1976–2005 гг. Большинство моделей занижают тренды за этот период как температуры (годовые – 27 из 30 моделей, зимние – 26, летние – 11), так и осадков (годовые – 24, зимние – 22, летние – 25). Для осадков модели нередко показывают противоположный знак

тренда (годовые – 14 из 30, зимние – 16, летние – 14). По этой причине прогноз целесообразно формулировать в аномалиях по отношению к современной норме.

По результатам воспроизведения трендов годовой температуры 17 моделей из 30 дают погрешность ниже средней, 18 моделей лучше других воспроизводят тренды осадков, 11 моделей входят одновременно в число лучших по воспроизведению и температуры, и осадков.

Результаты тестирования дают возможность уменьшить неопределенность оценки влияющих параметров в рассматриваемом регионе и построить оптимальную ансамблевую климатическую проекцию, усреднив результаты лишь тех моделей, ошибка которых не превышает заданной величины. В нашем случае были выбраны 15 моделей, полусумма ошибок которых по трендам среднегодовой температуры и осадков не превышали средних по всему рассмотренному ансамблю.

Важен вопрос о пространственной детализации климатических проекций, получаемых при помощи гидродинамических моделей. В публикации [94] авторы пришли к выводу, что для отдельно взятой модели СМIP5 оптимальный масштаб пространственного осреднения имеет порядок ~2000 км. Такое осреднение минимизирует случайную составляющую расчетов, с одной стороны, но с другой – уничтожает важные пространственные детали. Оптимальным является осреднение по регионам, характеризующимся однородными климатическими изменениями. Нами было создано такое районирование для территории России и сопредельных стран (рисунки 8.1).

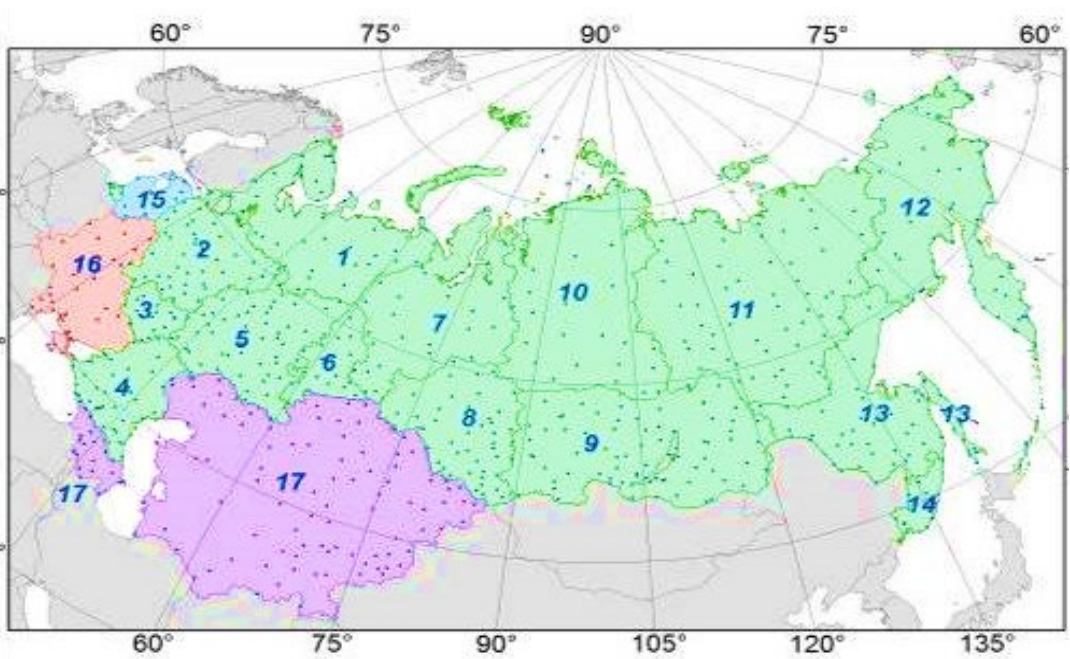


Рисунок 8.1 – Регионы на территории России и сопредельных стран, характеризующиеся однородностью современных изменений климата

Оно основано на анализе пространственных закономерностей полей температуры воздуха и осадков. Используемые для этого методы и полученные результаты, в том числе обоснование районирования на *рисунке 8.1*, даны в наших предшествующих публикациях [83], [93], [95].

С учетом сказанного, при оценке будущих климатических условий в районе оз. Ханка результаты расчетов по гидродинамическим моделям СМIP5 осреднялись по всему Приморскому краю. В каждом узле модельной сетки были рассчитаны прогнозируемые на 2030 год (соответствует модельным расчетам, осредненным за 30-летний период 2016–2045 гг.) приращения температуры воздуха и осадков по отношению к современному периоду 1976–2005 гг., которые далее были осреднены по всем узлам сетки, попадающим в Приморский край. Полученные таким методом для района озера Ханка прогнозы изменения среднегодовой температуры воздуха и годовых сумм осадков по отношению к современному периоду 1976–2005 гг. приведены в *таблице 8.1*.

*Таблица 8.1*

Годовые изменения температуры и осадков по моделям СМIP5 за период 2011 – 2050 гг.

Температура, °С		Осадки, мм/год	
Наблюдения, 1976–2005 гг.	Прогнозируемое приращение на 2016–2045 гг.	Наблюдения, 1976–2005 гг.	Прогнозируемое приращение на 2016–2045 гг.
4,0	1,6	581,1*	26,1

\* без учета поправки на выдувание

### 8.1.2 Сценарии изменения стока рек в бассейне озера

Ниже приводятся проекции изменения годового речного стока в бассейне оз. Ханка на перспективу до середины столетия, полученные на основе данных климатических моделей, представленных в рамках 5-й фазы проекта сравнения объединенных моделей СМIP5.

Современные МОЦАО обычно представляют из себя комплекс нескольких моделей климатических систем, взаимодействующих между собой. Расчет стоковой составляющей в МОЦАО осуществляется в климатической системе «Земная поверхность». Исходной метеорологической информацией для расчета речного стока являются данные, предоставляемые блоком «Атмосфера». В стандартизированный, для всех существующих МОЦАО, набор расчетных переменных блока «Земная поверхность» входит два параметра, характеризующие поверхностный речной сток:

-  $mrgos$  и  $mrgo$  [96].

-  $mrgos$  (англ. surface runoff flux) – поверхностный сток. Является среднемесячной переменной, входящей в «базовый набор» стандартизированных расчетных

параметров глобальных климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Данный модельный параметр выражает поверхностный речной сток, формирующийся в расчетной ячейке модели и предоставляемый в размерности  $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ .

-  $\text{mrgo}$  (англ. total runoff flux) – общий сток. Имеет аналогичную размерность с  $\text{mrgos}$ . Основное отличие  $\text{mrgo}$  от  $\text{mrgos}$  заключается в том, что  $\text{mrgo}$  дополнительно учитывает сток, дренирующий толщу почвенного покрова.

Выполненный ранее в ГГИ анализ результатов расчетов моделей для территории Российской Федерации [97] показал, что сток полученный по  $\text{mrgos}$  более чем на 40 % занижен по сравнению с фактическим, в то время как  $\text{mrgo}$ -сток близок к фактическому. Принимая во внимание тот факт, что по своему определению общий, или как его еще называют – суммарный сток, наиболее близко соответствует понятию фактического речного стока, а также, что в целом для территории РФ значения  $\text{mrgo}$ -стока более близки к наблюдаемым, а  $\text{mrgos}$  сильно занижены, в настоящей работе для дальнейшего анализа использовались данные  $\text{mrgo}$ .

В качестве исходной информации анализировались модельные расчеты более чем по 50-ти климатическим моделям (с учетом их модификаций) проекта CMIP5. Описание проекта и соответствующих МОЦАО приведено в [97], а расчетные данные доступны на нескольких интернет-порталах [98].

На начальном этапе проверялось наличие смоделированных данных по стоку у рассматриваемых климатических моделей, т.к. некоторые из них не предоставляют в полном объеме данные по стоковым составляющим  $\text{mrgo}$  и  $\text{mrgos}$ , в отличие от данных по приземной температуре воздуха и осадкам.

Проверялось наличие данных по историческому прогону (сценарий historical) за период 1981–2000 гг., а также двум прогнозным сценариям: RCP-4.5 и RCP-8.5, за периоды 2011–2030 гг. и 2041–2060 гг. Если данные по какой-либо модели отсутствовали за любой из вышеуказанных прогонов или периодов, то данная модель в дальнейшем анализе участия не принимала.

В качестве прогнозных сценариев были приняты прогнозные проекции RCP-4.5 и RCP-8.5. RCP-4.5 – это умеренно агрессивный сценарий, а RCP-8.5 – наиболее агрессивный сценарий антропогенного воздействия.

В результате выполненного анализа из всего набора данных было отобрано 32 МОЦАО, предоставляющих информацию по речному стоку в полном объеме как за исторический, так и за прогнозные периоды по каждому сценарию. Ввиду того, что климатические модели имеют различное пространственное разрешение, которое составляет от  $0.95^\circ \times 1.25^\circ$  для модели CESM1-BGC до  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$  у моделей BCC-csm1.1, CanESM2, MIROC-ESM и др., данные по всем моделям приводились, с помощью специально разработанного в ФГБУ «ГГИ» программного обеспечения, к единой сетке с разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Каждому конкретному узлу сетки бассейна оз. Ханка присваивалось ближайшее модельное значение. Далее проводилась

проверка полученных в узлах сетки слоев стока для каждой из рассматриваемой модели на ошибки. Проверялось и анализировалось наличие отрицательных значений, нулевых и заведомо завышенных значений слоев стока. Все данные за каждый месяц для каждой модели записывались в специальный файл. Затем осуществлялась проверка на соответствие полученных значений фактическим величинам стока рек в исследуемом водосборе. После выполнения проверки, на основе полученных матриц регулярной сетки, рассчитывались месячные значения слоя стока для бассейна оз. Ханка путем элементарного осреднения по территории водосбора. Из полученных таким образом месячных значений рассчитывался годовой слой стока.

Дальнейший анализ полученных рядов значений годовых слоев стока выполнялся следующим образом.

Рассчитывались возможные изменения речного стока для каждой модели на перспективу для бассейна оз. Ханка. Расчеты осуществлялись для прогнозных периодов 2011–2030 гг. и 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1981–2000 гг., который был выбран как базовый. Вычисления производились для «жесткого» сценария RCP-8.5, а также для сравнения – умеренно-агрессивного сценария RCP-4.5. Полученные результаты осреднялись за эти 20-летние периоды и сравнивались с соответствующими значениями за период 1981–2000 гг.

Далее для каждого из двух прогнозных периодов для всех моделей строились карты-схемы возможных изменений речного стока по территории бассейна оз. Ханка.

На основе анализа рассчитанных значений стока, его изменений и построенных карт осуществлялся дополнительный отсев моделей методом визуального анализа достоверности воспроизведения ими речного стока: из выбранного количества климатических моделей отбрасывались те, которые демонстрировали наименее правдоподобные результаты по сравнению с фактическими значениями, а также наименее соответствующие наблюдающимся в рядах фактических значений годовых слоев стока современным изменениям и их тенденциям.

В результате проведенного анализа были отсеяны 8 моделей, а из оставшегося количества МОЦАО был сформирован модельный ансамбль и дальнейший анализ осуществлялся на основе ансамблевого осреднения данных по стоку 24 МОЦАО.

В *таблице 8.2* приведены изменения годовых слоев речного стока в бассейне оз. Ханка на перспективу (периоды: 2011–2030 гг. и 2041–2060 гг.) по отношению к базовому периоду (1981–2000 гг.), рассчитанные как для каждой из отобранных моделей, так и для ансамбля 24 МОЦАО для сценариев радиационного воздействия RCP-4.5 и RCP-8.5.

Согласно результатам ансамблевого осреднения ожидается увеличение речного стока в исследуемом бассейне по обоим сценариям. Причем увеличение стока незначительно отличается для «умеренного» сценария RCP-4.5 по сравнению с

«агрессивным» RCP-8.5 сценарием: соответственно 4 % и 6 %, 10 % и 7 % для 2011–2030 гг. и 2041–2060 гг. периодов. Стоит отдельно отметить, что полученные величины изменений стока более чем в два раза меньше, чем межмодельный разброс рассчитанных значений для каждого периода и сценария.

Таблица 8.2

Изменения годовых слоев речного стока (в мм и %) в бассейне оз. Ханка для периодов 2011–2030 гг. и 2041–2060 гг. XXI в. по отношению к базовому периоду (1981–2000 гг.), полученные по 24 гидродинамическим моделям проекта CMIP5 путем ансамблевого осреднения данных

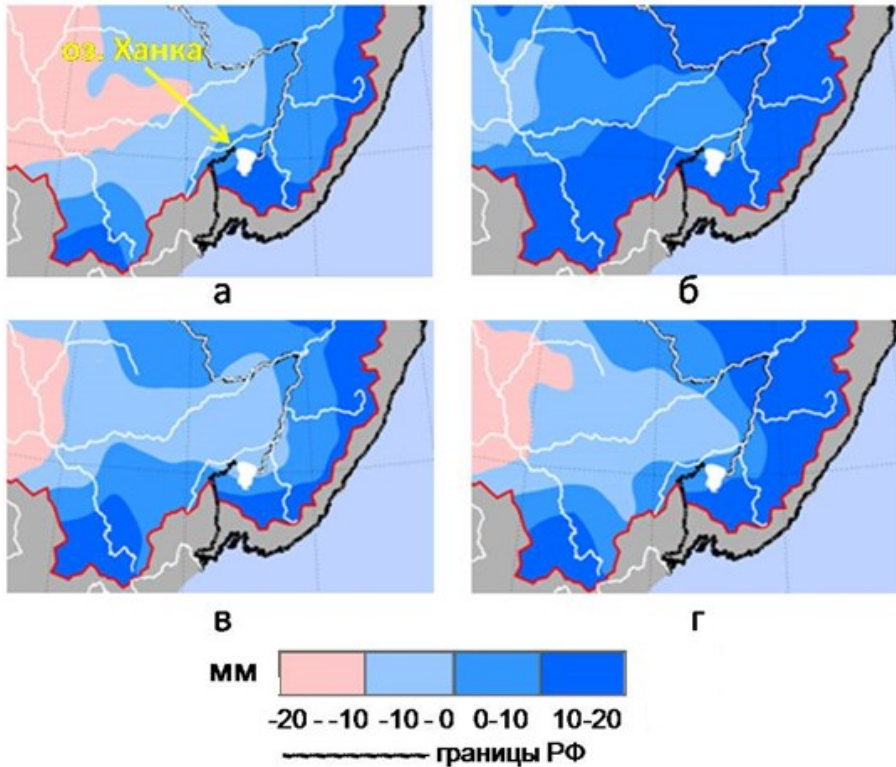
№	Модель	RCP-45				RCP-85			
		2011-2030		2041-2060		2011-2030		2041-2060	
		мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
1	bcc-csm1-1-m	-2	-1	48	21	59	26	42	18
2	BNU-ESM	3	2	27	14	-27	-13	-4	-2
3	CanESM2	28	11	-20	-8	15	6	30	12
4	CCSM4	-9	-4	15	7	28	14	39	19
5	CESM1-BGC	-14	-8	38	22	31	18	72	41
6	CESM1-WACCM	11	6	44	22	-8	-4	-44	-22
7	CMCC-CM	-30	-11	-15	-6	-44	-17	18	7
8	CMCC-CMS	-3	-1	-18	-6	-6	-2	-64	-22
9	CNRM-CM5	57	21	32	12	-1	0	2	1
10	CSIRO-Mk3-6-0	49	25	35	18	81	42	51	26
11	FGOALS-g2	-23	-6	33	8	19	5	-47	-11
12	FIO-ESM	-36	-10	-63	-18	-38	-11	-17	-5
13	GFDL-CM3	55	42	62	48	19	15	40	31
14	GFDL-ESM2G	16	8	47	23	47	23	15	7
15	GFDL-ESM2M	-31	-13	36	15	5	2	36	15
16	GISS-E2-R-CC	-20	-8	-21	-9	-16	-7	-17	-7
17	inmcm4	44	10	-18	-4	-19	-4	-14	-3
18	IPSL-CM5B-LR	-9	-7	-11	-10	-14	-12	0	0
19	MIROC5	52	14	9	2	-11	-3	52	14
20	MPI-ESM-LR	35	16	60	28	-16	-8	8	4
21	MPI-ESM-MR	14	7	22	11	34	16	7	4
22	MRI-CGCM3	-8	-4	10	5	2	1	6	3
23	NorESM1-M	23	13	24	13	50	28	42	23
24	NorESM1-ME	5	3	61	33	52	28	41	22
Кол-во моделей дающих увеличение(+)/уменьшение (-) стока		+13 / -11		+17 / -7		+14 / -10		+17 / -7	
Ансамбль 24 моделей		9±29*	4	18±32	10	10±33	6	12±34	7

Примечание: \* - межмодельное стандартное отклонение

Полученные по стоковым данным МОЦАО результаты показывают, что как в первой четверти XXI века, так и к его середине в бассейне оз. Ханка следует



ожидать увеличения величин годового стока (до 9–18 мм), по сравнению с его значениями в последние десятилетия XX века, но полученные изменения находятся в пределах статистической погрешности их определения (рисунки 8.2).



Ансамбль 24 моделей (CMIP-5).

- а - за период с 2011 по 2030 к периоду с 1981 по 2000 гг. Сценарий RCP-45;
- б - за период с 2041 по 2060 к периоду с 1981 по 2000 гг. Сценарий RCP-45;
- в - за период с 2011 по 2030 к периоду с 1981 по 2000 гг. Сценарий RCP-85;
- г - за период с 2041 по 2060 к периоду с 1981 по 2000 гг. Сценарий RCP-85

Рисунок 8.2 – Изменения годовых слоев стока по территории бассейна оз. Ханка

### 8.1.3 Сценарии изменения испарения с поверхности озера

Анализ зависимости испарения с акватории оз. Ханка от метеорологических процессов, выполненный ранее [48], показал, что основное влияние на его величину оказывают скорость ветра и влажность воздуха. Дефицит влажности воздуха является универсальной характеристикой влажности, поскольку его величина является результатом совместного влияния температуры воздуха, осадков, солнечной радиации и других факторов климатической системы.

Изменения скорости ветра объясняют более 50 % дисперсии величины испарения с акватории озера. Дефицит влажности воздуха определяет чуть более 20 % дисперсии годового испарения. Совместное влияние этих факторов объясняют более 70 % дисперсии величины испарения.

Сценарий изменения величины испарения с акватории оз. Ханка в будущем будет определяться именно этими метеорологическими переменными.

На водосборе озера за исследуемый период (1949–2015 гг.) отмечался устойчивый рост годовой температуры воздуха на всех станциях, расположенных на водосборе озера. В среднем за этот период температура воздуха увеличилась на 1,5–1,6 °С. С 1976 г. интенсивность роста температуры возросла по сравнению с предыдущими десятилетиями [69], [70] в основном за счет роста температуры за теплый период.

На фоне роста годовой температуры воздуха за этот же период (1949–2015 гг.) произошли изменения других метеорологических параметров, в разной степени связанных с количеством приходящей солнечной радиации на подстилающую поверхность:

- температура водной поверхности озера (в теплый период года) увеличилась на 1,1 °С или на 4 % от средней величины (13,4 °С);
- величина максимальной упругости (упругости насыщенного водяного пара) выросла на 0,97 мб или на 4 % от среднего (12,2 мб) в основном за счет роста в теплый период.

Абсолютная влажность воздуха в районе оз. Ханка за этот же период увеличилась на 0,86 мб (чуть менее 5 % от среднего 8,9 мб) в основном благодаря интенсивным изменениям с 1976 г. В предыдущий период направленные изменения не превышают величину естественной изменчивости абсолютной влажности.

Важным элементом, влияющим на величину термического режима территории, является наличие облачности, уменьшающей величину приходящей на поверхность солнечной радиации. Согласно [69], [99] с 1950 г. в регионе расположения озера Ханка отмечается незначительно увеличение облачности (с величиной тренда не более 0,04 % / 10 лет).

Изменения величины годовых осадков с 1949 по 2015 гг. имеют более сложный характер. На фоне общего увеличения осадков (0,4 мм/год или 28 мм за весь период) отчетливо выделяются периоды роста и уменьшения их величины [48].

После резкого падения величины осадков в 1975 г. на фоне кратковременных изменений прослеживается общий рост их величины на 54 мм (1975–2002 гг.). В последний период (2004–2015 гг.) интенсивность роста величины годовых осадков возросла и составила 99 мм при наличии коротких периодов уменьшения их величины [48].

Совместное влияние всех этих климатических характеристик отражается в изменении величины дефицита влажности воздуха, непосредственно влияющего на величину испарения с акватории оз. Ханка.

При общем увеличении годового дефицита влажности воздуха с 1949 по 2015 гг. выделяются два периода изменений его величины: 1949–1980 и 1981–2015 гг. (рисунок 8.3).

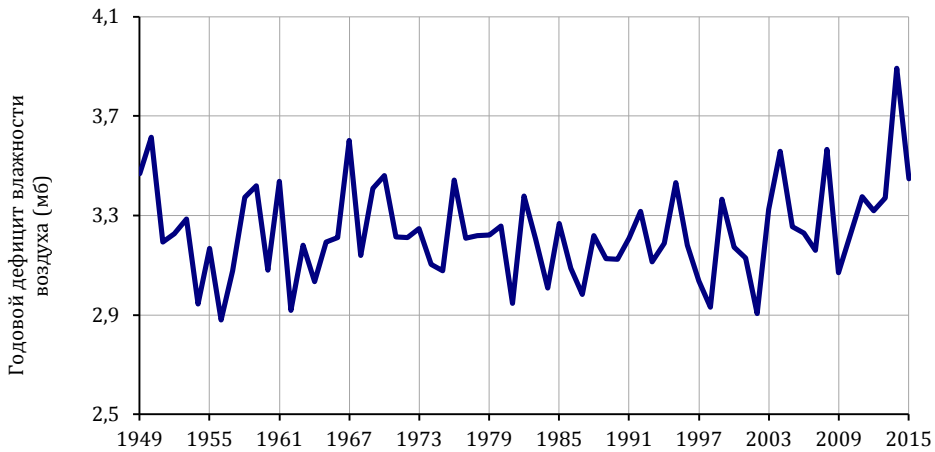


Рисунок 8.3 – Изменения годовой величины дефицита влажности воздуха (мб) с 1949 по 2015 гг.

Направленные изменения дефицита до 1980 г. практически отсутствуют, поскольку его резкое падение до 1956 г. компенсируются ростом в последующие годы.

С 1981 г. отмечается устойчивый рост величины годового дефицита влажности воздуха на 0,3 мб или 5 % от среднего (3,2 мм). Это изменение объясняется ростом величины дефицита в теплый период года [48]. В течение последних 13 лет (2003–2015 гг.) интенсивность изменений максимальна. Для этого периода средняя величина годового дефицита влажности составила 3,3 мб, увеличившись на 3 % даже по сравнению со средним за 1976–2015 гг.

Модельные оценки изменения климатических характеристик в ближайшем будущем достаточно условны и зависят от используемых моделей и рассматриваемого сценария изменения климата [70], [90], [100]. Наиболее надежный прогноз возможен только для температуры воздуха.

Учитывая все недостатки модельных оценок, на основе использования ансамбля моделей МОЦАО (поколения СМIP5) возможно оценить величину изменения годовой температуры воздуха и годовых осадков в районе оз. Ханка (см. раздел 8.1.1). Модельные оценки получены по отношению к базовому периоду 1976–2005 гг. Именно в этот период наблюдаются наиболее интенсивные изменения всех метеорологических характеристик.

Согласно модельному прогнозу на ближайшие 2–3 десятилетия средняя величина годовой температуры будет равна 5,5–5,6°C. По отношению к величине базового периода (3,9–4,0°C) рост составит немногим более 40 %.

Величина годовых осадков в соответствии с модельными расчетами увеличится на 4,5 % по отношению к среднему за 1976–2005 гг.

Изменения температуры воздуха и осадков с неизбежностью приведут к изменению остальных метеорологических параметров.

К середине XXI века можно ожидать:

- рост средней сезонной температуры поверхности воды до 14,0–14,5 °С (на 4,4–8,2 % от среднего за 1976–2005 гг. 13,4 °С);
- увеличение среднегодовой максимальной упругости воздуха до 13–13,5 мб (на 6,6–10,7 % от среднего за 1976–2005 гг. 12,2 мб);
- рост среднегодовой абсолютной влажности воздуха до 9,5–9,8 мб (на 5,6–8,9% от среднего за 1976–2005 гг. 9,0 мб).

Изменения количества облачности в разных моделях отличаются по знаку тенденций ее изменения. Однако из оценок ансамблей моделей можно сделать вывод, что изменения облачности в целом за год к 2045 г. будут незначительны (не более 0–2) [69], [70].

На фоне изменения всех метеорологических характеристик увеличится величина среднегодового дефицита влажности воздуха. Его рост при этом будет невелик; к середине XXI века дефицит влажности может составить 3,4–3,5 мб (6–9 % от среднего за 1976–2015 гг., равного 3,2 мб).

Основное влияние на величину испарения с поверхности оз. Ханка оказывает скорость ветра. На акватории озера и для прибрежной озерной станции Астраханка отмечается устойчивое уменьшение скорости ветра. В целом за год это уменьшение для акватории озера составляет 14 % с 1949 по 2015 гг. или 12 % с 1957 по 2015 гг. (по отношению к средним). На станции Астраханка, где наблюдения за скоростью ветра на испарительной площадке ведутся с 1957 г., падение скорости ветра за теплый период составляет 26 % по отношению к среднему. При этом для озера скорость ветра рассчитывалась по данным наблюдений на высоте флюгера на прибрежных станциях, а на м/ст Астраханка наблюдения за скоростью ветра на высоте 2 м [48].

Одной из причин такого уменьшения скорости ветра в регионе может быть падение давления и уменьшение барических градиентов [101], [102].

Прогноз скорости ветра представляет наибольшую сложность при использовании МОЦАО. Разброс модельных оценок настолько велик, что даже использование ансамблей моделей не позволяет получить оценки, превышающие естественную межгодовую изменчивость скорости ветра [70], [100]. Именно поэтому для оценки скорости ветра часто используют оценки изменения атмосферного давления (барический градиент), хотя и они достаточно условны [69].

Согласно [69], [103] межгодовая изменчивость атмосферного давления в регионе расположения оз. Ханка к 2045 г. уменьшится не более, чем на 0,15 мб. При этом пространственный градиент практически не изменится.

На основании этих оценок и интенсивности падения скорости ветра за период 1976–2005 гг. можно сделать вывод, что к середине XXI века среднегодовая скорость ветра составит 3,5–3,3 м/с при сохранении величины изменений за базовый период (-0.5 м/с за 30 лет).

Величина годового испарения с поверхности оз. Ханка за исследуемый период (1949–2015 гг.) уменьшилась на 11 % (по отношению к среднему 666 мм). Для базового периода (1976–2005 гг.) это уменьшение составило всего 6 % (от среднего 646 мм). Уменьшение величины испарения обуславливается в основном изменениями в летний период [48].

Прогноз величины испарения с использованием МОЦАО практически невозможен вследствие большого разброса модельных оценок [70], [99]. Поэтому большинство прогнозов основано на изменении метеорологических характеристик, определяющих его величину и характер изменений.

Опережающий рост максимальной упругости водяного пара по отношению к абсолютной влажности воздуха приводит к увеличению дефицита влажности воздуха. Рост абсолютной влажности воздуха согласуется и с ростом осадков в этом регионе.

Рост дефицита влажности воздуха будет способствовать увеличению его влияния на величину испарения с акватории озера.

Продолжающееся незначительное уменьшение скорости ветра приведет к уменьшению величины испарения, однако, его влияние будет меньше, чем для периода 1949–2015 гг.

Действительно, характер изменения испарения в последний период (с 2002 г.) позволяет говорить о формировании тенденции к некоторому росту его величины. Однако этот рост начинается с минимальной за весь период величины среднего испарения (612 мм). Подобное увеличение испарения отмечается и на прибрежных станциях Турий Рог (данные доступны до 2011 г.) и Астраханка как для испарителя ГГИ-3000, так и для бассейна 20 м<sup>2</sup>. Аналогичные тенденции изменения испарения с начала 2000-х годов прослеживаются и в других регионах России.

Разнонаправленные изменения дефицита влажности воздуха и скорости ветра будут ограничивать рост величины испарения в будущем. Поэтому к середине XXI века изменения величины среднегодового испарения будут минимальны. По отношению к базовому периоду (1976–2005 гг.) величина испарения уменьшится, но не более, чем на 1,7 % (таблица 8.3).

Необходимо дополнительно объяснить величину изменений дефицита влажности воздуха на 6–9 % на фоне изменения его величины на 0,3 % с 1976 по 2005 гг. Максимальный рост величины дефицита влажности отмечается с 2003 года, когда рост среднего составил 3 %. Именно эти изменения объясняют величину роста дефицита влажности на ближайшие 30 лет.

Изменения годовых величины испарения и определяющих его метеорологических характеристик на ближайшие 2–3 десятилетия по сравнению с базовым периодом

Характеристика	Базовый период (1976–2005 гг.)		Период прогноза (2016–2045 гг.)	
	средняя величина	изменения, %	величина прогноза	изменения, %
Дефицит влажности воздуха (мб)	3,2	0,01 / 0,3	3,4÷3,5	6÷9
Скорость ветра (м/с)	3,8	-0,5 / 6,9	3,5÷3,4	8÷10
Испарение (мм)	646	-77,9 / 6,0	640÷635	0,9÷1,7

## 8.2 Сценарии развития водохозяйственной деятельности

### 8.2.1 Сценарии развития водоемких отраслей экономики

При анализе хозяйственной деятельности в бассейне оз. Ханка, выполненном в главе 5, было показано, что основной антропогенный фактор в бассейне озера – это орошаемое земледелие, требующее больших затрат воды. От перспективного развития этой отрасли напрямую зависят объемы забираемой из озера воды и соответственно, безвозвратные потери в бассейне озера. Для разработки сценариев развития такой водоемкой отрасли экономики, какой является орошаемое земледелие, были проанализированы существующие и утвержденные Правительством РФ долгосрочные планы развития агропромышленного комплекса [17], [104], [105], а также региональные проекты развития сельского хозяйства, которые отражены в «Социально-экономической стратегии развития Приморского края до 2025 г.» [106], в государственной программе Приморского края «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, повышение уровня жизни сельского населения Приморского края» на 2013–2020 гг. [107].

В соответствии с общегосударственными программами в долгосрочном прогнозе развития аграрной сферы можно выделить три основных сценария развития агропромышленного комплекса.

Первый сценарий – инерционный, предполагающий сохранение сложившихся тенденций, ограниченных инвестиционных возможностей и размеров государственной поддержки агропромышленного комплекса.

Второй сценарий – инновационный, он предусматривает функционирование аграрного сектора в условиях интенсификации производства, осуществления Государственной программы развития сельского хозяйства на 2013–2020 гг.» [107] и в соответствии с параметрами, заложенными в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. [108].

Третий сценарий – кризисный, описывающий ситуацию через призму современных проблем в отечественной и мировой экономике.

Во всех трех сценариях предполагается, что в ближайшей перспективе произойдет замедление или снижение темпов роста аграрного производства.

Государственная комплексная программа развития сельского хозяйства на 2013–2020 гг. предусматривает сохранение финансовой поддержки наиболее значимых отраслей агропромышленного комплекса. Кроме того, программой предусмотрено оказание адресной помощи регионам по наиболее перспективным направлениям развития аграрного комплекса, определить которые – задача самих регионов. При этом долю продукции, произведенной с использованием прогрессивных ресурсосберегающих технологий, намечается довести в сельском хозяйстве не менее чем до 50–60 %.

Обобщение региональных программ Приморского края указывает на отсутствие конкретных показателей в перспективных планах развития орошаемого земледелия как в Приморье в целом, так и в бассейне оз. Ханка в частности.

Встречаются отдельные показатели, по которым сложно судить о перспективном развитии орошения в рассматриваемом регионе. Так, в программе [109], которая в основном ориентирована на сохранение существующего мелиоративного фонда страны, объекты Приханкайской низменности указаны только в двух пунктах приложения к ней. В них речь идет о строительстве акведука на Астраханском межхозяйственном магистральном канале в Ханкайском районе и реконструкции головного водозаборного сооружения на р. Арсеньевка в Анучинском районе. Программа [105] нацелена на восстановление и развитие орошаемых земель. В соответствии с этой программой планируется к 2020 г. довести площадь орошаемых земель до 6,1 млн га, в том числе посевов риса до 0,3 млн га. Водопотребление риса на эту площадь было оценено в 8,1 км<sup>3</sup> при оросительной норме-брутто, равной 27,0 тыс. м<sup>3</sup>/га. Распределение посевов риса по территории России не приводится, а в перечне перспективных площадей орошаемых земель России земли Дальневосточного ФО отсутствуют.

Согласно Стратегии развития Приморского края [106] особое внимание уделено вовлечению в сельскохозяйственный оборот неиспользуемых или малоиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения. В области ирригации намечается обеспечить 100% освоение мелиорируемых земель. Практические предложения по реализации намеченных целей предлагаются специалистами ФГБУ «Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения по Приморскому краю» [110]. В этой работе в перспективе к 2020 г. предлагается оставить площади земель с оросительной сетью на современном уровне, относящиеся только к рисовым системам. В настоящее время, как было указано выше, эта величина оценивается в 60 тыс. га, из них в 2015 г. было фактически освоено (полито) около 1/3 ирригационно-подготовленного фонда рисовых систем края. Непосредственно в бассейне

оз. Ханка такие площади оцениваются в 50 тыс. га. Площади орошаемых земель под другими культурами рекомендуется уменьшить [110].

Оценки будущего состояния рисосеяния в бассейне озера Ханка приводятся и в ряде публикаций специалистов и ученых Дальнего Востока [111], [112]. В них сделаны попытки конкретизировать показатели перспективного развития ирригации с учетом высотного положения уровня воды в озере. Авторами были сделаны выводы о том, что при низком стоянии уровня воды в озере (68,0 м БС) площадь посевов риса не должна превышать 18 тыс. га. При высоком положении уровня (69,74 м БС) допускалась возможность полностью использовать сток рек, стекающих в озеро, что позволяло увеличить размеры рисосеяния до 130 тыс. га.

Таким образом, все перспективные планы развития ориентированы по двум направлениям. Первое – сохранение существующего мелиоративного фонда РФ и постепенное его увеличение к 2020 г. до уровня 6,1 млн га. Такими площадями орошаемых земель Россия обладала в начале 1990-х годов, т. е. перед распадом СССР. В этих проектах для территории Приморского края и бассейна оз. Ханка количественные показатели предполагаемого развития ирригации отсутствуют, в том числе и в отношении рисосеяния.

Второе направление – изменение существующих орошаемых площадей с приведением отдельных количественных характеристик.

При этом, во всех планах присутствует требование обеспечить 100 % освоение имеющихся мелиорируемых земель. Как было указано выше, в настоящее время по различным источникам суммарная площадь ирригационно-подготовленного фонда по Приморскому краю оценивается в 60–65 тыс. га, в бассейне оз. Ханка – 50–55 тыс. га. Следует отметить, что в рассмотренных перспективных планах развитие рисосеяния приводилось только до уровня 2020–2025-х годов и только для Приморского края. Более отдаленная перспектива не рассматривалась.

Основываясь на всей имеющейся информации, предлагаются три сценария развития орошаемого земледелия в бассейне оз. Ханка до 2030 г.

В основе первого сценария – кризисного – заложена предпосылка о том, что дальнейшего увеличения ирригации в бассейне озера происходить не будет и площади посевов риса до 2030 г. останутся неизменными.

Во втором сценарии – инерционном – при расширении посевов риса предусматривается восстановить свыше 80 % существующего мелиоративного фонда.

В третьем сценарии – инновационном – допускается рост поливных земель за счет вовлечения в сельскохозяйственный оборот новых участков, находящихся за существующей в настоящее время границей ирригационно-освоенных территорий. Т.е. предполагается полностью освоить все имеющиеся ирригационно-подготовленные орошаемые земли.



## 8.2.2 Оценка безвозвратного водопотребления в бассейне озера Ханка на перспективу до 2030 года

Для оценки перспективных планов состояния орошения и следовательно, безвозвратных потерь в бассейне оз. Ханка, были учтены показатели, приведенные в рассмотренных выше документах, а также опубликованные в научной литературе [110], [111], [112], [40] и применены методические подходы, разработанные ранее в ФГБУ «ГГИ» при оценках безвозвратного водопотребления потерь в орошаемой земледелии [40].

За исходный уровень размеров рисосеяния, было принято среднее значение за 2010–2015 гг., период относительно стабильных величин орошаемых земель в бассейне оз. Ханка, которое составляет 21,5 тыс. га. В этот период доля орошаемых земель в Приханкайской низменности оценивается в 87 % от всех поливных земель Приморского края. Это соотношение и было принято при расчете перспективных величин посевов риса.

Для оценки величин безвозвратных потерь с орошаемых площадей были приняты следующие допущения и нормы.

Для кризисного сценария, в соответствии с которым не предполагается дальнейшего увеличения ирригации в пределах бассейна озера и площади посевов риса до 2030 г. останутся неизменными, расчет был выполнен с учетом современных показателей безвозвратного водопотребления, когда с одного гектара орошаемых земель безвозвратные потери составляют от 7 до 9 тыс. м<sup>3</sup> в год (поливной период). Эта величина получена на основании имеющейся официальной информации по заборам и сбросам воды в бассейне озера за последние 15 лет.

Для инерционного и инновационного сценариев для расчета приняты рекомендуемые для этого региона оросительные нормы для риса, составляющие от 10 до 12 тыс. м<sup>3</sup>/га [110]. При этом до 2020 г. оросительная норма для риса принимается 12 тыс. м<sup>3</sup>/га, а после этого периода – 10 тыс. м<sup>3</sup>/га. В переходные годы 2016–2017 гг. и 2021–2022 гг. допускаются оросительные нормы от 12 тыс. м<sup>3</sup>/га до 10 тыс. м<sup>3</sup>/га. Величина 12 тыс. м<sup>3</sup>/га представляется реальной в случае расширения посевов риса и одновременной реконструкции рисовых оросительных систем за счет государственных программ, иностранных и частных инвестиций в развитие рисосеяния в этом регионе. Оросительная норма в 10 тыс. м<sup>3</sup>/га заложена в прогноз на период 2021–2030 гг. с учетом модернизированной системы орошения с меньшими потерями при транспортировке воды по оросительным каналам.

Ежегодные значения площадей посевов риса и безвозвратного водопотребления в бассейне оз. Ханка по трем сценариям до 2030 года приведены в *таблице 8.4*.

Годовые величины перспективных посевов риса (тыс. га) и объемов безвозвратного водопотребления (млн м<sup>3</sup> в год) в бассейне оз. Ханка

Год	Сценарии					
	Кризисный		Инерционный		Инновационный	
	Орошаемые земли	Безвозвратное водопотребление	Орошаемые земли	Безвозвратное водопотребление	Орошаемые земли	Безвозвратное водопотребление
2010-2015	21,5	173	21,5	173	21,5	173
2016	21,5	173	21,8	196	22,6	198
2017	21,5	173	22,0	198	23,9	263
2018	21,5	173	23,9	257	26,6	319
2019	21,5	173	25,7	296	29,4	323
2020	21,5	173	27,6	304	32,2	354
2021	21,5	173	29,4	306	35,0	375
2022	21,5	173	31,3	313	37,8	378
2023	21,5	173	33,1	331	40,5	405
2024	21,5	173	35,0	350	43,2	432
2025	21,5	173	36,8	368	46,1	461
2026	21,5	173	38,7	387	48,9	489
2027	21,5	173	40,5	405	50,0	500
2028	21,5	173	42,4	424	52,4	524
2029	21,5	173	44,2	442	54,2	542
2030	21,5	173	46,1	461	55,0	550

Таким образом, в соответствии с предлагаемыми тремя сценариями развития орошаемого земледелия в бассейне озера Ханка размеры рисосеяния остаются на современном уровне – около 22 тыс. га (кризисный сценарий), увеличиваются до 46 тыс. га (инерционный сценарий) или до 55 тыс. га (инновационный сценарий). При этом, безвозвратное водопотребление может составить до 200 млн м<sup>3</sup> в год, более 450 млн м<sup>3</sup> в год и 550 млн м<sup>3</sup> в год соответственно кризисному, инерционному и инновационному сценариям.

## **9. Вероятностный прогноз изменения уровня озера Ханка**

### **9.1 Динамико-стохастическая воднобалансовая модель многолетних колебаний уровня озера Ханка на основе статистических моделей элементов водного баланса озера**

Осуществление водохозяйственных мероприятий на озере и его водосборе в целях управления его уровнем режимом, в том числе и для защиты территорий от опасного воздействия вод, требует изучения закономерностей формирования водного баланса водоема, и их представление в форме вероятностного прогноза. 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, испарения и стока из озера. Сток из озера через р. Сунгач является функцией уровня воды в озере и рассчитывается по формуле расхода через водослив с широким порогом. Расчет наполнения и сработки озера осуществляется с учетом батиграфических кривых (зависимостей объема или площади от уровня воды). Собственно, динамико-стохастическая модель колебаний уровня озера представляет собой уравнение водного баланса в дискретной форме, записанное для годовых интервалов времени. Входными случайными процессами являются среднегодовые значения притока к озеру и среднегодовой слой осадков на водную поверхность, а расходными компонентами – слой испарения с водной поверхности и объем стока из озера. Поскольку объемы оттока, испарения и осадков зависят от уровня воды в озере (от соответствующей площади водной поверхности), то решение уравнения баланса на каждом временном шаге осуществляется итерационным методом. Получение статистических характеристик уровня воды в озере осуществляется методом имитационного моделирования, заключающемся в многократном решении уравнения водного баланса для искусственно смоделированных последовательностей объемов притока, слоев испарения и осадков большой продолжительности. В результате такого подхода получается длительный ряд наполнений озера (уровней воды), статистическая обработка которого позволяет определять расчетные статистические характеристики.

Первая попытка решения задачи прогноза уровня воды на основе нелинейной вероятностной модели оз. Ханка была предпринята в 1988 г. Бакановым К. Г. в рамках диссертационного исследования [113]. Ограниченность вычислительных возможностей и чрезмерное упрощение вероятностной модели (сведение к решению уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова) не позволили автору этой работы получить достаточно надежные выводы, и, кроме того, в модели не учитывались масштабы хозяйственной деятельности на китайской части водосбора, информация о которой в те годы была существенно ограничена.

В настоящем исследовании, в рамках разработки стохастической модели колебаний уровня воды, использован динамико-стохастический метод моделирования уровня режима озера, основанный на моделировании искусственных последовательностей, необходимых для гидрологических водобалансовых расчетов, в ходе которых оцениваются последствия реализации различных водохозяйственных мероприятий. В общем случае метод состоит в моделировании составляющих водного баланса, представляющих собой попарно коррелированные случайные процессы, путем разложения по совокупности естественных ортогональных функций (ЕОФ). Временные ряды годовых значений компонент водного баланса оз. Ханка характеризуются небольшими значениями автокорреляции, что позволяет использовать для моделирования схему простой цепи Маркова.

## 9.2 Одномерные стохастические модели составляющих водного баланса озера Ханка

Имеющиеся в гидрометеорологии представления о характере колебаний исследуемых процессов как о стохастическом случайном процессе позволяют применять аппарат теории случайных функций и вероятностные методы для описания многолетних колебаний 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.

Известно, что в случае марковского процесса для описания случайной величины достаточно задания двумерного закона распределения  $p(x, y)$  [114] [115]. Зададим двумерный закон распределения  $p(x, y)$  в виде билинейного разложения в ряд симметрического ядра корреляционного интегрального уравнения по ортонормированным собственным функциям [116]. Для генерации искусственных рядов стока, испарения и осадков из заданного двумерного распределения получаем условное распределение, которое в интегральном виде имеет вид:

$$F(y/x) = \int_0^y p_2(y) \cdot \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k P_k(x) P_k(y) \right] dy \quad (9.1)$$

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

Моделирование случайных значений по схеме Маркова 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 (9.1) 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). Предлагаемая схема позволяет моделировать искусственные ряды без учета их взаимной корреляции, учитывается корреляция смежных по времени значений.

Смоделировав таким образом ряды притока, испарения и осадков, на основании уравнения водного баланса озера определяются (рассчитываются) реализации выходного процесса – изменения уровня режима озера и связанный с ним сток (расход) р. Сунгач.

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 полученные в результате применения рассмотренной схемы моделирования, приведены в *таблице 9.5*.

Таблица 9.5

Выборочные оценки статистических характеристик компонент водного баланса оз. Ханка (годовые значения)

Ряд наблюдений	Параметры распределения				
	Среднее	$C_v$	$C_s$	$C_s/C_v$	$r(1)$
Приток	1,87* км <sup>3</sup>	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

Примечание: \* – приток с российской территории

Рассмотренная схема моделирования искусственных рядов предполагает, что рассматриваемые процессы являются попарно независимыми. Из анализа корреляционной матрицы компонент водного баланса (таблица 9.6) 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.

Таблица 9.6

Корреляционная матрица компонент водного баланса оз. Ханка (годовые значения)

	Приток	Осадки	Испарение
Приток	1,00	0,76	-0,29
Осадки	0,76	1,00	-0,17
Испарение	-0,29	-0,17	1,00

### 9.3 Моделирование многомерных последовательностей компонент водного баланса озера с учетом взаимной корреляции

Задача моделирования многомерных последовательностей случайных величин (в данном случае стока, осадков и испарения) с учетом парных корреляций 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 [117] [118], который позволяет моделировать нормально распределенные искусственные последовательности, характеризуемые корреляционной матрицей, задаваемой по данным наблюдению.

Известно, что любое индивидуальное поле из имеющейся совокупности полей можно разложить по собственным функциям, которые заранее не известны и должны быть определены по данным имеющейся совокупности полей, свойства которых определяют индивидуальные особенности искомым функций [117]. 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 [119].

Таким образом, исходная последовательность полей может быть 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 получают последовательности коэффициентов разложения, для которых подбирается стохастическая модель, в нашем случае – авторегрессионная (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.

Необходимо отметить, что уверенно подобрать стохастическую модель процесса по одной выборке ограниченной длины (в гидрологии – менее 100) сложно. Возникает необходимость вычисления статистических характеристик этих коэффициентов исходя из заданного вида авто- и взаимокорреляционных функций исходных гидрометеорологических полей.

На последнем этапе искусственные последовательности попарно некоррелированных коэффициентов разложения пересчитываются в нормализованные значения полей стока. Преобразование классического нормального распределения производится сначала в совокупность равномерно-распределенных величин (обеспеченностей), а затем – в распределение величин с произвольным законом распределения (в том числе и с трехпараметрическим гамма-распределением Крицкого-Менкеля, которое хорошо описывает распределение случайных величин компонент водного баланса оз. Ханка).

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

#### 9.4 Результаты вероятностного прогнозирования уровня озера

На основе предложенного метода осуществлено моделирование последовательностей годовых значений составляющих элементов водного баланса оз. Ханка. Поскольку предлагаемый способ моделирования многомерных гидрологических характеристик предусматривает переход к нормально распределенным числам, то необходимый этап обработки состоит в переводе рядов стока в нормально распределенные последовательности и вычислении для них параметров межрядной связности. Оценив ковариационную матрицу нормализованных последовательностей компонент водного баланса, определим ее собственные вектора итерационным методом.

Определив собственные вектора и задав авто- и взаимокорреляционные функции последовательностей, имеющих нормальное распределение, рассчитаем на основе теоремы о линейном преобразовании случайной функции автоковариационные функции коэффициентов разложения по ЕОФ и параметры их авторегрессионных моделей. После вычисления всех необходимых параметров смоделируем 3-мерный вектор с нормальным распределением компонентов, объемом 100000 членов. Оценка коэффициентов парной корреляции смоделированной многомерной

последовательности показала, что различия между заложенными при моделировании и полученными по искусственному ряду параметрами незначительны.

Заключительный этап моделирования – переход к гамма-распределенным величинам – осуществляется с помощью таблиц распределения С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля. Получим, таким образом, 100000 годовых значений для 3 исследуемых характеристик (осадки, испарение и приток). Результаты подсчета моментных оценок параметров распределений свидетельствуют о том, что параметры безусловных распределений воспроизводятся с приемлемой точностью.

Реализации выходного процесса (т. е. уровня озера и связанного с ним расхода р. Сунгач) получаются с помощью решения уравнения водного баланса озера в конечно-разностной форме с использованием морфометрической зависимости  $F(H)$  и зависимости расхода в истоке р.Сунгач от уровня озера  $Q(H)$  для оз. Ханка (рисунок 6.31). Расчеты выполняются при условии, что уравнение водного баланса для средних величин стока, испарения, осадков и среднего уровня и оттока из озера должно выполняться точно, т.е. невязка баланса за многолетний период должна быть равна нулю.

Расчеты водного баланса выполнялись в условиях четырех вариантов водопользования, включающих различные условия оттока из озера и сценарии использования стока р. Мулинхэ (таблица 9.7).

Таблица 9.7

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

Вариант	Режимы использования водных ресурсов (сценарии)	Отметка порога
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

Результаты стохастического моделирования уровня для разных вариантов в виде значений уровня различной обеспеченности приведены в таблице 9.8.

Таблица 9.8

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

Параметры распределения уровня	Варианты (в соответствии с таблицей 2.18)			
	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, $\sigma$	0,54	0,52	0,85	0,82
$r(1)$	0,84	0,85	0,85	0,86



Параметры распределения уровня	Варианты (в соответствии с таблицей 2.18)			
	1	2	3	4
Средний расход р. Сунгач, $Q$ , м <sup>3</sup> /с	54,9	54,7	69,1	68,6
Расчетные значения уровня оз. Ханка, $H$ , м				
0,1%	70,54	71,04	72,02	72,55
1,0%	70,08	70,57	71,27	71,79
5,0%	69,70	70,19	70,64	71,16
10%	69,48	69,99	70,32	70,83
20%	69,22	69,76	69,95	70,45
50%	68,73	69,29	69,22	69,76
80%	68,29	68,84	68,49	69,06
90%	68,07	68,64	68,15	68,70
95%	67,91	68,47	67,88	68,44
99%	67,63	68,19	67,41	67,96

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 *рисунке 9.4* и в *таблице 9.9* для различных вариантов расчетов. Прогнозные кривые распределения для всех четырех вариантов расчета 1 %-ной и 50 %-ной обеспеченности приведены на *рисунках 9.5* и *9.6*, соответственно.

Таблица 9.9

Вероятностный прогноз уровня оз. Ханка в виде доверительных интервалов различной обеспеченности для различных вариантов водопользования

Вариант водопользования 1						
Обеспеченность, %	Вероятностный прогноз уровня озера с заблаговременностью лет					
	2	5	10	20	30	50
1	70,53	70,44	70,28	70,17	70,05	70,11
10	70,03	69,87	69,64	69,47	69,51	69,48
50	69,53	69,18	68,89	68,77	68,72	68,72
90	69,07	68,56	68,22	68,14	68,07	68,07
99	68,80	68,12	67,74	67,63	67,60	67,65
Вариант водопользования 2						
Обеспеченность, %	Вероятностный прогноз уровня озера с заблаговременностью лет					
	2	5	10	20	30	50
1	70,68	70,73	70,72	70,65	70,55	70,61
10	70,18	70,15	70,07	69,97	70,01	69,99
50	69,70	69,52	69,38	69,32	69,28	69,28
90	69,26	68,92	68,71	68,69	68,62	68,62
99	69,00	68,48	68,25	68,19	68,16	68,20

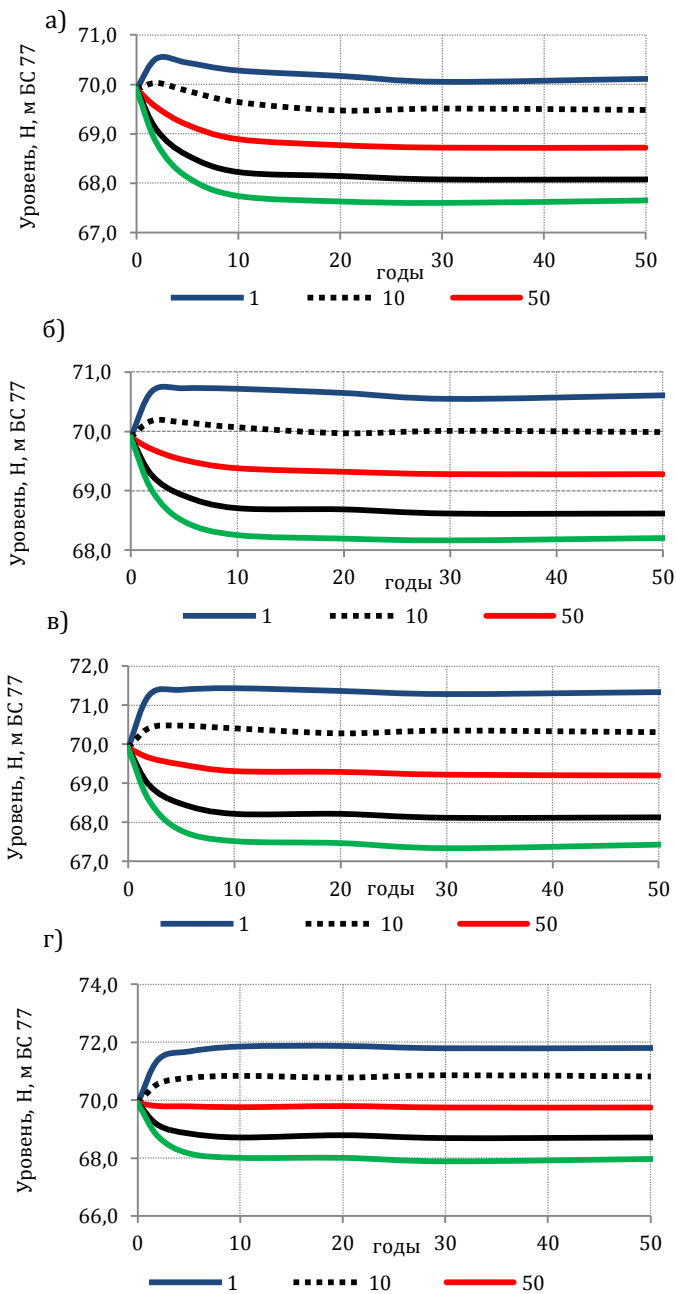
Вариант водопользования 3						
Обеспеченность, %	Вероятностный прогноз уровня озера с заблаговременностью лет					
	2	5	10	20	30	50
1	71,26	71,39	71,43	71,36	71,28	71,33
10	70,42	70,48	70,41	70,28	70,35	70,31
50	69,65	69,48	69,31	69,29	69,22	69,20
90	68,94	68,47	68,21	68,21	68,11	68,12
99	68,54	67,78	67,51	67,46	67,33	67,42
Вариант водопользования 4						
Обеспеченность, %	Вероятностный прогноз уровня озера с заблаговременностью лет					
	2	5	10	20	30	50
1	71,41	71,69	71,86	71,88	71,80	71,81
10	70,57	70,77	70,84	70,78	70,86	70,82
50	69,80	69,79	69,76	69,80	69,75	69,75
90	69,13	68,84	68,70	68,78	68,68	68,70
99	68,74	68,16	68,01	68,01	67,89	67,97

Анализ полученных графиков показывает, что доверительный интервал вероятностного прогноза во всех случаях расчета достаточно большой. Средние значения уровня и максимальные уровни обеспеченностью 1 % могут отличаться для разных случаев на величину до одного метра.

Еще один вывод состоит в том, что уровенный режим озера в существенной мере определяется условиями стока из озера, что и определяет направление разработки мероприятий по снижению максимальных уровней воды в озере.

Обращает на себя внимание, что полученные в результате динамико-стохастического моделирования значения уровня оз. Ханка малой обеспеченности для различных вариантов расчета превышают установленные в результате палеогеографических реконструкций [120] максимальные значения уровня озера Ханка. Установленная отметка максимального уровня озера, приходящегося на период 16 века нашей эры, находится в диапазоне 70,0–70,5 м БС77, тогда как расчетные обеспеченные 1 % значения уровня для всех вариантов расчета составляют 70,08–71,79 м БС77, а отметки уровня 0,1 % обеспеченности находятся в диапазоне 70,54–72,55 м БС77. Как следует из результатов палеогеографических реконструкций, изменения уровня оз. Ханка, в голоцене носили сложный характер [120]. В [120] указано, что «... во второй половине голоцена оз. Ханка испытало не менее трех регрессивных фаз продолжительностью несколько сотен лет (3,2–8,0 тыс. лет назад, V–VI вв. н. э., XIV–начало XIX вв. н. э.) и три трансгрессии (2,8–3,2 тыс. лет назад, VII–VIII вв. н. э., XV в.н.э.). В настоящее время озеро развивается в трансгрессивной фазе». По результатам полевых работ, выполненных специалистами Приморского УГМС сделан вывод, что отметку 70,0–70,5 м БС77 можно считать максимальной за последние 500 лет.

Результаты современных гидрологических расчетов приводят к более высоким отметкам, что объясняется, в первую очередь следующей основной причиной.



а – вариант 1, б – вариант 2, в – вариант 3, г – вариант 4

Рисунок 9.4 – Вероятностный прогноз уровня оз. Ханка в виде доверительных интервалов различной обеспеченности для различных вариантов водопользования

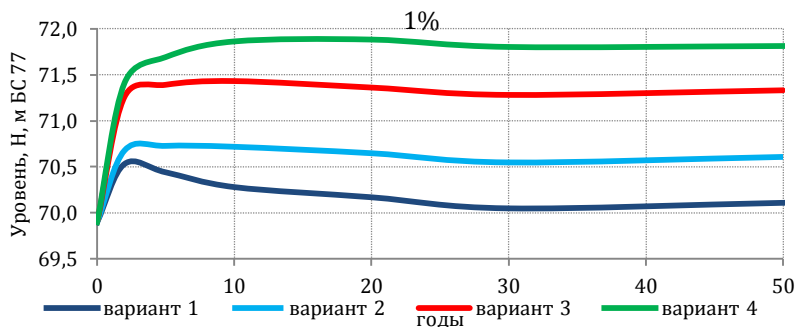


Рисунок 9.5 – Прогнозное значение уровня вероятностью 1 % при различной заблаговременности прогноза для разных сценариев водопользования

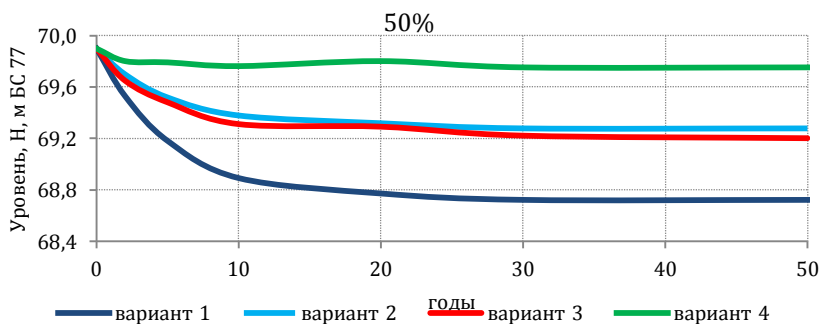


Рисунок 9.6 – Среднее значение прогнозного уровня воды оз. Ханка

Колебания уровня озера Ханка до начала производства в 20 веке значительных мелиоративных работ в пойме озера происходили в условиях ненарушенного рельефа. В настоящее время свободному стеканию вод озера, при повышении его уровня, по прилегающей пойме препятствует, в первую очередь, наличие дамбы обвалования Александровского канала. Этот факт учтен при построении цифровой модели рельефа (ЦМР) в прибрежной зоне российской части озера Ханка (см. главу 4), которая была выполнена до отметки 72,50 м БС77 (граница области покрытия ЦМР – дамба обвалования Александровского канала). Наличие дамбы обвалования нашло свое отражение и при построении уточненной батиграфической кривой оз. Ханка (см. главу 4).

В настоящее время озеро, согласно палеогеографическим реконструкциям, находится в трансгрессивной фазе, то есть отмечается рост уровня или его повышенные отметки по сравнению с предыдущим периодом. Результаты вероятностных расчетов и моделирования, выполненные с использованием современных климатических данных, подтверждают этот факт.

Необходимо также отметить, что результаты инженерных расчетов используются при проектировании сооружений и обосновании мероприятий, чей период эксплуатации не превышает 30–50 лет. На больший период распространять полученные выводы сложно, поскольку и природная и водохозяйственная обстановки могут сильно измениться, а уровеньный режим озера весьма чувствителен к таким изменениям, особенно к изменениям пропускной способности участка р. Сунгач в истоке. Тем не менее, можно сделать вывод, что полученные современные оценки уровеньного режима оз. Ханка согласуются с имеющимися сведениями о его колебаниях в прошлом, с учетом антропогенного изменения рельефа в прибрежной зоне озера (дамба обвалования Александровского канала).

## 10. Обоснование мероприятий по снижению уровня озера

### 10.1 Оценка возможности изменения пропускной способности русла р. Сунгач с учетом естественных русловых процессов

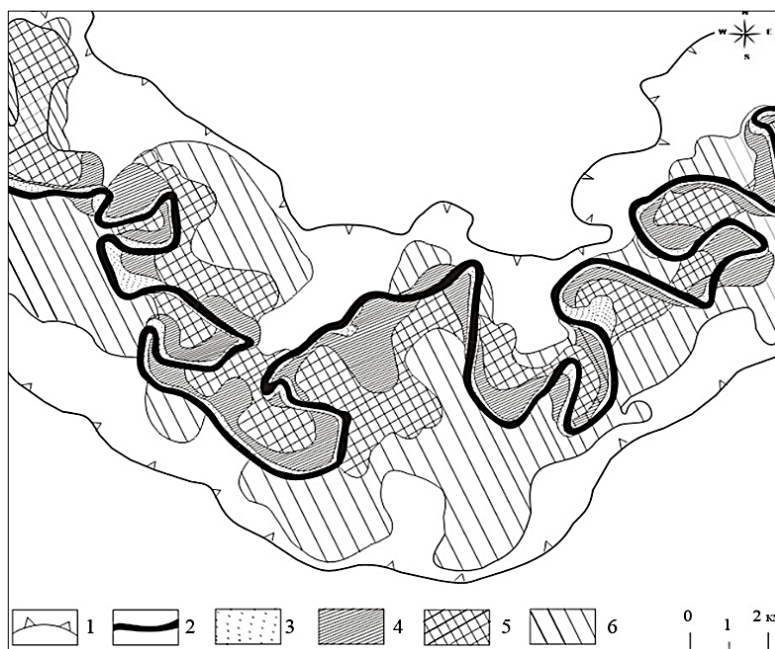
#### 10.1.1 История формирования пойменно-руслового комплекса

Сток, дренирующий Ханкайскую котловину в северо-восточном направлении, существовал начиная с середины плейстоцена [2]. Однако формирование современного пойменно-руслового комплекса р. Сунгач началось только около 3 тыс. лет назад, когда границы озера Ханки приняли очертания, близкие к современным [121]. Являясь одной из самых молодых рек Приморья [122], р. Сунгач не имеет собственной выработанной долины с четкими границами. Она наследует пониженные участки Приханкайской равнины (рисунк 10.1), а в нижнем течении формируется в пределах пойменного комплекса р. Уссури. Границы поймы р. Сунгач также не выражена четко, поскольку пояс руслоформирования не ограничивается бортами долины, а интенсивность и направленность русловых деформаций определяется вековыми циклами колебания уровня воды в оз. Ханка.



Рисунок 10.1 – Приханкайская равнина в верхнем течении р.Сунгач (фото Е. К. Губаревой)

Позднеголоценовая история формирования пойменно-руслового комплекса р. Сунгач выявляет общую тенденцию направленного врезания ее русла в подстилающую поверхность. На *рисунке 10.2* представлен фрагмент геоморфологической карты в верхнем течении реки, сохранившей характерные для меандрирующего русла следы блуждания (изогнутые гривы и старицы) потоков разных периодов и водности. *Рисунок 10.2* иллюстрирует существование в пределах пойменного комплекса реки Сунгач пяти разновозрастных и разновысотных пойменных генераций (включая современную), выделенных по данным многоспектрального анализа космических снимков. Абсолютные отметки бровок стариц 3-й и 4-й пойменных генераций расположены ниже отметок стариц 5-й генерации. Установленная историческая ширина пояса руслоформирования и размеры пойменных массивов различной генерации свидетельствуют о высокой активности процессов формирования поймы и, следовательно, об интенсивности процессов руслоформирования на начальном формировании пойменно-руслового комплекса р. Сунгач. По мере развития долины реки к середине субатлантического периода интенсивность этих процессов постепенно снизилась. Следы присутствия 2-ой генерации выражены незначительно, а современная пойменная генерация практически отсутствует. Это свидетельствует о продолжении цикла пониженной русловой активности вплоть до настоящего времени.

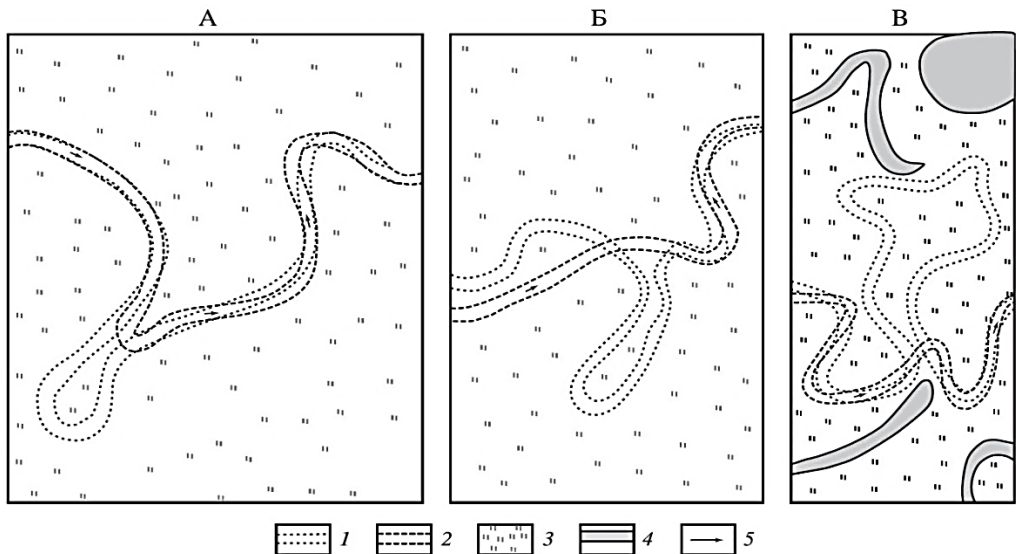


*Рисунок 10.2* – Фрагмент геоморфологической карты пойменно-руслового комплекса р. Сунгач в верхнем течении: 1 – граница пойменно-руслового комплекса; 2 – современное русло; 3-6 – пойменные генерации (2-я, 3-я, 4-я и 5-я, соответственно) [по Е. К. Губаревой, 2015]

Реконструкция развития русла в исторической перспективе выглядит следующим образом. С понижением уровня воды в оз. Ханка в целом снижалась и водность реки. Вследствие этого происходил постепенный переход от условий протекания потока по неглубокому разветвленно-извилистому руслу к постепенному врезанию одного основного рукава, формированию одорукавного меандрирующего русла и сокращению продолжительности затопления прирусловых территорий.

### 10.1.2 Современная морфология и динамика русла р. Сунгач

Современный пойменно-русловой комплекс р.Сунгач врезан на 3–5 м относительно прилегающих водораздельных поверхностей. Русло представляет собой следующие одна за другой серии свободных излучин, разделенных незначительными по протяженности прямолинейными вставками. Излучины часто наблюдаются сложной, неправильной формы (омеговидные, синусоидальные, пальцеобразные), что характерно для рек, формирующихся в относительно устойчивых к размыву грунтах. На отдельных участках русло приобретает причудливые очертания, особенно в местах недавних спрямлений (*рисунок 10.3*). В настоящее время на р.Сунгач насчитывается 319 свободных излучин (*таблица 10.1*). При этом на долю сегментных излучин, обычно доминирующих на реках в других регионах страны [123], приходится порядка 60 %, что позволяет отнести р. Сунгач к числу наиболее извилистых рек России. Коэффициент извилистости ее русла (отношение длины реки к длине оси пояса меандрирования) – 2,4.



1 – современное русло; 2 – русло в 1952 г.; 3 – пойма; 4 – старицы; 5 – направление течения [124]

*Рисунок 10.3* – Характерные формы спрямления излучин на р. Сунгач



Распространение свободных излучин на р. Сунгач, находящихся на разных стадиях развития

Участок	Общее количество излучин на участке	Сегментные			Омего-видные	Синусоидальные
		Пологие	Развитые	Крутые		
		%	%	%		
Исток – устье р. Белая (219–151 км)	114	22	25	12	20	21
Устье р. Белая – устье р. Черная (151–72 км)	105	25	20	13	18	24
Устье р. Черная – устье (72–0 км)	100	34	18	16	13	19
Весь р. Сунгач	319	27	21	14	17	21

Ширина русла реки Сунгач (в пределах бровок) на всем протяжении изменяется от 30 до 80 м. Преобладающая глубина при меженных уровнях – 3–5 м. Минимальные глубины (0,9 м) отмечены на устьевом участке, где расположен 1,5-километровый песчано-галечный перекаат, лимитирующий при низких уровнях заход в реку судов. Также следует выделить бар и истоке реки и мелководный (до 0,6 м) участок в 2,5 км ниже истока. Максимальные глубины даже в условиях летней межени могут достигать 10 м (на 52 км от устья). Скорость течения Сунгача незначительная и составляет в нижнем течении 0,5–0,7 м/с, в верхнем – 0,4–0,5 м/с. При высоких уровнях нередко наблюдается обратное течение, особенно на устьевом участке (как следствие подпора со стороны Уссури) [125].

Продольный профиль русла р.Сунгач представлен на *рисунке 10.4*. Он имеет выпуклую форму, характерную для потенциально вертикально врезающихся рек. Общий уклон реки незначительный, соответствует широкопойменным руслам и изменяется в диапазоне 0,03÷0,05‰.

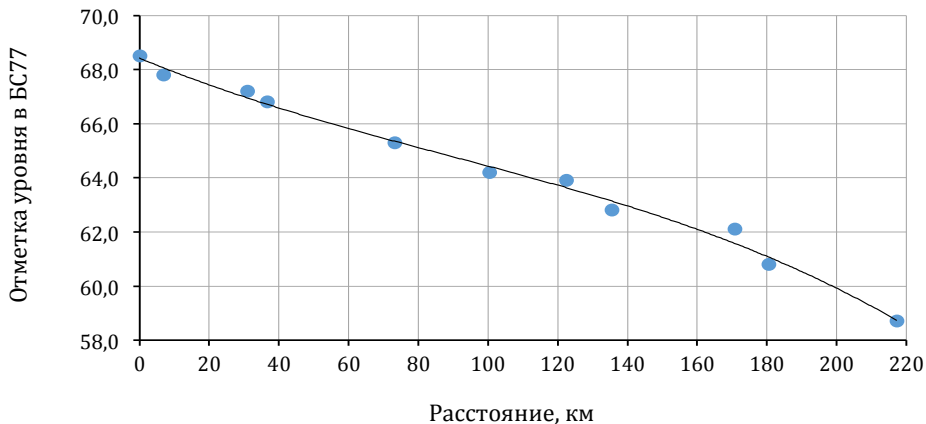


Рисунок 10.4 – Продольный профиль русла р. Сунгач

Пойма реки широкая – от 1,5 до 4 км, двусторонняя, сильно изрезана старицами и имеет сегментно-гребнистую структуру с выровненной поверхностью. Амплитуда колебания отметок рельефа на поверхности поймы в среднем не превышает 1–2 м. Берега реки преимущественно покрыты густой травяной и кустарниковой растительностью, устойчивы к размыву, но нередко имеющие обрывистый профиль. Высота их в верхнем течении – 0,5–2,0 м, в низовьях – до 3–4 м (*рисунк 10.5*).

а)



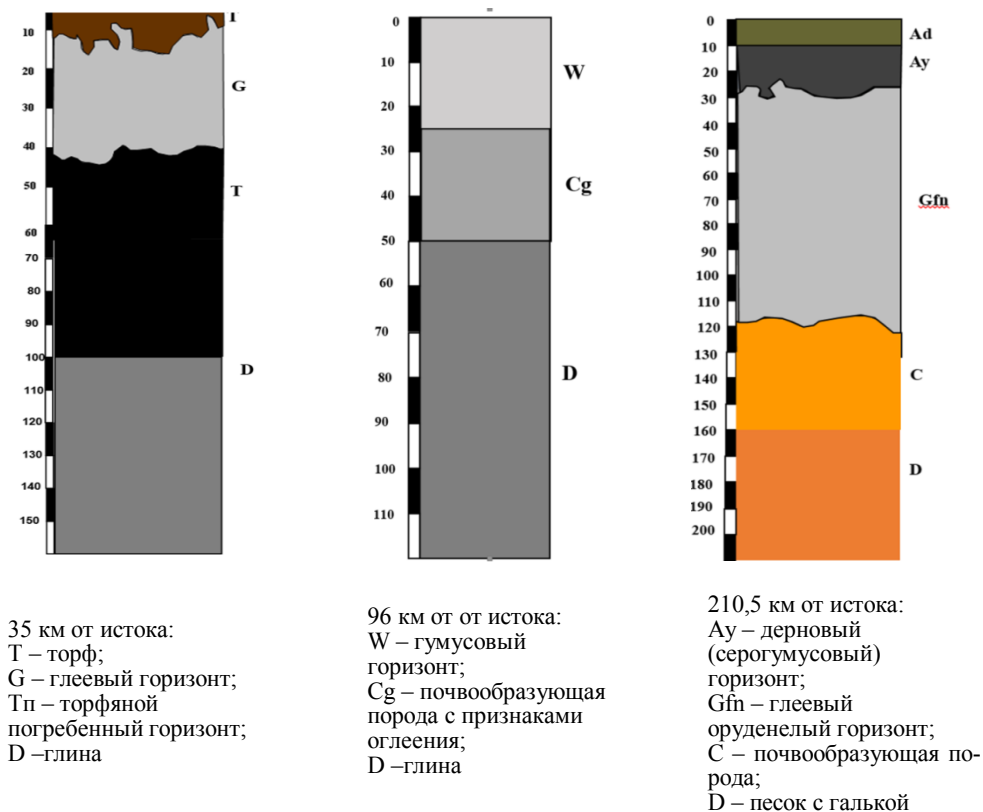
б)



*Рисунок 10.5* – Река Сунгач в среднем (а) и нижнем (б) течении (фото А. С. Завадского)

Грунты, слагающие толщу пойменных отложений, представлены преимущественно средними и тяжелыми суглинками, переслаиваемыми слоями торфа. Песчаная фракция в большинстве разрезов не вскрыта. Исключение составляет устьевой участок, приуроченный к долине р. Уссури, сложенной песчано-галечным аллювием.

На *рисунке 10.6* показаны характерные разрезы пойменных отложений в верхнем, среднем и нижнем течении реки. Такое строение пойменных отложений определяет морфологию русла. Русло выстилается преимущественно глинистыми грунтами и илистой фракцией. Крайне малая величина стока донных руслоформирующих наносов определяет отсутствие в русле крупных грядовых образований. При этом сток взвешенных наносов достаточно велик. Суммарный сток взвешенных наносов, выносимых рекой Сунгач из оз. Ханка может составлять порядка 95 тыс. т/год [2]. В период сильных ветров в результате взмучивания илистых донных отложений на прибрежных участках оз. Ханка мутность воды достигает 170 мг/л. Такие условия характерны для мелководного бара вблизи истока Сунгача, что изначально определяет относительно высокую концентрацию взвешенных наносов в водном потоке, поступающем в русло реки.



*Рисунок 10.6* – Характерные разрезы пойменных отложений на правом берегу р. Сунгач в верхнем, среднем и нижнем течении

Несмотря на крайне незначительный объем дополнительного поступления наносов в результате размыва берегов (о чем будет сказано ниже), высокая мутность воды в Сунгаче может сохраняться на всем протяжении и быть на порядок выше, чем в Уссури в узле их слияния (рисунки 10.7).



Рисунок 10.7 – «Шлейф мутности», сформированный водным потоком Сунгача в районе его впадения в Уссури

Свободные условия развития русловых деформаций, дефицит стока русло-образующих наносов, естественная зарегулированность стока воды и цикличность колебания уровня воды в оз. Ханка, незначительные уклоны, устойчивый к размыву состав пойменных отложений – это перечень ведущих природных факторов, определяющих интенсивность и направленность русловых деформаций р. Сунгач. Последние десятилетия плановые деформации русла проявляются преимущественно в виде локальных размывов вогнутых берегов отдельных излучин, а также периодически происходящих спрямлений отдельных излучин или целых их серий. При этом не наблюдается развитие пляжей на выпуклых берегах излучин, характерное для процесса свободного меандрирования, а пойменные массивы выпуклых берегов излучин имеют уклон к руслу реки в их вершинах, что характерно для вертикально врезающихся русел.

Как отмечалось выше, современная пойменная генерация в долине реки практически отсутствует, что обусловлено структурой пойменных отложений и дефицитом донных руслоформирующих наносов. В условиях преобладания тяжелосуглинистой и глинистой фракции в разрезах береговых уступов размываемый на немногочисленных эрозионных участках грунт выносится вниз по течению транзитом во взвешенном состоянии, не формируя средних русловых форм и не откладываясь на выпуклых берегах излучин в качестве первичной основы пойменного массива. Отсутствие пляжа на выпуклом берегу излучины приостанавливает симметричный размыв подмыва вогнутого берега, т. е. приостанавливает процесс меандрирования речного русла, которое постепенно превращается в извилистое орографическое русло со слабыми и

не закономерными деформациями. В этих условиях размыв речных берегов происходит преимущественно в тех местах, где устойчивость грунта не превышает размывающую силу потока. В целом, это придает неправильную ломаную форму излучинам и при наличии очень широкого, унаследованного пойменного пространства со следами палеоруслу, создает хаотичные локальные направления развития современных излучин и всего речного русла в пределах пояса руслоформирования.

Определенную роль в формировании неправильной формы современных излучин играет и особый гидрологический режим, обусловленный колебаниями уровня оз. Ханка. В результате, кроме незначительного размыва в вершинах излучин, на отдельных участках обнаруживаются и признаки сползания излучин вниз по течению по типу ограниченного меандрирования. Так, в верхнем течении реки на участке 21–34 км от истока, кроме следов существования излучин неправильной формы и разных размеров и несмотря на степень развитости этих излучин, соответствующую свободному меандрированию, явно прослеживаются следы сползания отдельных излучин по типу ограниченного меандрирования (*рисунок 10.8*).



Рисунок 10.8 – Участок 21–34 км от истока со следами сползания излучин вниз по течению (деформации по типу ограниченного меандрирования)

Подобная схема русловых переформирований сохраняется и в среднем течении реки (*рисунок 10.9*), поскольку здесь действуют те же факторы руслоформирования, что и на верхнем участке – малые уклоны, широкое пространство для плановых деформаций и глинистые трудно размываемые грунты.

На нижнем участке реки с укрупнением грансостава руслоформирующих грунтов, размываемость дна и берегов (включая суммарный фронт размыва) увеличивается, о чем свидетельствует более плавные, по сравнению с верхними участками, формы излучин (*рисунок 10.10*).

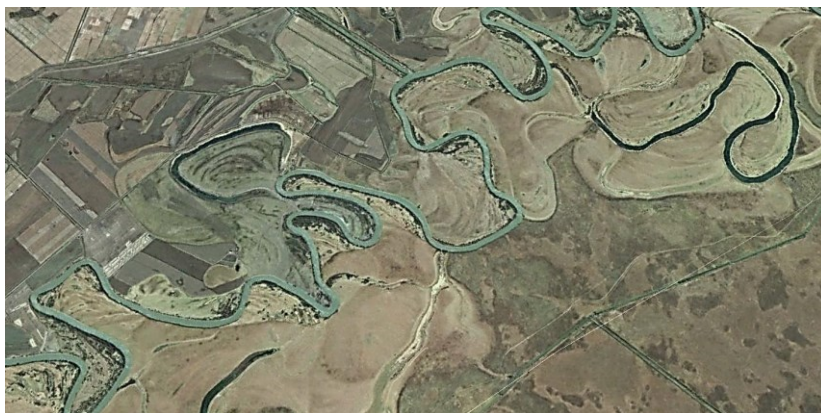


Рисунок 10.9 – Участок в среднем течении реки Сунгач с излучинами неправильной формы и многочисленными следами спрямлений



Рисунок 10.10 – Участок в нижнем течении реки со следами спрямлений и более плавными формами излучин

Результаты анализа данных ДЗЗ за 1970–2016 гг. позволяют говорить о преобладании на Сунгаче стабильных берегов, не подверженных в последние десятилетия направленному размыву (таблица 10.2). Однозначно дешифрируются эрозионные процессы (в виде направленного смещения береговых бровок) не более чем на 20 % от общей протяженности береговой линии. При этом преобладающие скорости отступления берега на эрозионно-активных участках составляют 0,25–0,35 м/год. Сильно размываемые в многолетнем плане береговые участки (со скоростью  $>1$  м/год) являются редким исключением. По всей длине русла реки Сунгач отмечено всего 10 таких участков, общая протяженность фронта размыва в пределах которых не превышает 0,5 км. Большинство из них приурочено к нижнему течению реки, где также отмечается и наибольшая общая протяженность подверженных водной эрозии

участков – 26 % от общей длины береговой линии (*таблица 10.2*). Более интенсивные проявления русловых деформаций в низовьях Сунгача определяется выходом реки в долинный комплекс Уссури, где пойменная фракция характеризуется более широким распространением песчано-галечных отложений.

*Таблица 10.2*

Протяженность современных берегов р. Сунгача с разной степенью подверженности эрозионному воздействию водного потока\*

Участок	Тип берега (протяженность по двум берегам, %)			
	устойчивый (0–0,2 м/год)	слабо размываемый (0,2–0,5 м/год)	умеренно размываемый (0,5–1,0 м/год)	сильно размываемый (>1,0 м/год)
Исток – устье р. Белой (219–151 км)	83,0	14,5	2,5	0
устье р. Белой – устье р. Черной (151–72 км)	87,0	12,0	1	0
устье р. Черной – устье р. Сунгача (72–0 км)	73,7	20,0	6	0,3
весь р. Сунгач	81,9	15	3	0,1

Примечание: \* – по материалам сопоставления космических снимков за период 1970–2016 гг.

Таким образом, на фоне сложной иерархии пойменных генераций, относительной молодости самой долины реки для современной динамики русла Сунгача характерно замедление современных темпов русловых переформирований, в частности, уменьшение плановых деформаций. Так, анализ сопоставления разновременного картографического материала (начиная с «Карты южной части Уссурийского края», 1867 г., масштаб 1:42 000) показал, что наиболее яркой формой проявления плановых деформаций русла на всем протяжении реки, определяющей активность русловых переформирований, являются спрямления излучин или целых их серий. При этом, начиная с 1970-х годов XX века, отмечается заметное снижение частоты спрямлений русла (*таблица 10.3*).

Как видно из *таблицы 10.3*, наибольшая частота спрямления излучин (на 17 участках по длине реки) отмечалась в конце XIX-первой половине XX вв. Сопоставление числа спрямлений русла за последние 150 лет с колебаниями уровня озера Ханка представлено на рисунке 10.11. При анализе этого графика представляется нелогичным отсутствие спрямлений излучин в последние годы при стоянии столь высоких уровней воды в озере.

Объяснить это можно лишь уменьшением пропускной способности р. Сунгач в ее истоке с соответствующим уменьшением статистических характеристик стока воды среднелетних средних и максимальных расходов воды в этот период в связи.

## Участки спрямления русла р. Сунгач за период 1867–2016 гг.

№ участка	Период спрямления	км от устья*
1	1867–1940 гг.	217
2	1867–1940 гг.	204
3	1867–1940 гг.	197
4	1970–1984 гг.	187
5	1867–1940 гг.	182
6	1867–1940 гг.	169
7	1867–1940 гг.	167
8	1867–1940 гг.	143
9	1867–1940 гг.	132
10	1867–1940 гг.	111
11	1867–1940 гг.	98
12	1867–1940 гг.	90
13	1867–1940 гг.	83
14	1990–1995 гг.	74
15	1940–1970 гг.	53
16	1867–1940 гг.	45
17	1867–1940 гг.	38
18	1970–1984 гг.	29
19	1970–1984 гг.	23
20	1867–1940 гг.	22
21	1867–1940 гг.	12
22	1970–1984 гг.	6
23	1867–1940 гг.	3
24	1990–1995 гг.	2

Примечание: \* – по результатам оцифровки современного положения русла р. Сунгач ее длина составила 219 км, что отличается от устаревших справочных данных (212 км). Здесь и далее приводится актуализированный на 2016 г. километраж.

Важным морфологическим элементом, определяющим пропускную способность русла р. Сунгач в ее истоке, является прибрежный бар в оз. Ханка (рисунки 10.12), являющийся результатом вдольберегового транспорта наносов в озере, интенсивность и направление движения которых определяется действующими ветрами. В зависимости от преобладающей розы ветров и уровней воды в озере в отдельные периоды этот бар периодически разрастается, прикрывая собой исток реки и затрудняя сток воды из озера при уровнях ниже пойменных бровок. В годы развитого судоходства по системе «р. Уссури – р. Сунгач – оз. Ханка» бар подвергался регулярной расчистке. Однако в 70-е годы XX в. дноуглубительные работы были прекращены, что в дальнейшем привело к ухудшению условий стока воды из озера.



Отдельно стоит отметить такой фактор, как прекращение волнового воздействия от проходящих судов (в связи с прекращением использования р. Сунгач в качестве водного пути), которые оказывают весьма существенное эрозионное воздействие на берега малых рек (при незначительной ширине и большой извилистости русла).

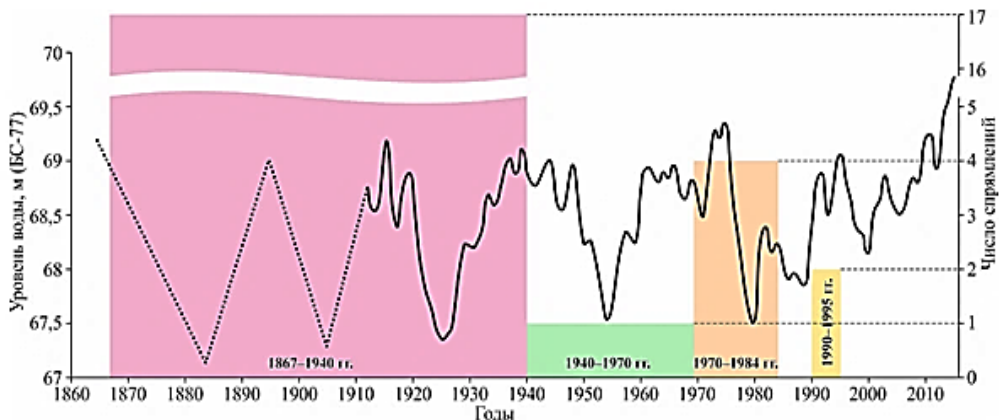


Рисунок 10.11 – Сопоставление числа спрямлений русла р. Сунгач с колебаниями уровня о. Ханка за последние 150 лет (восстановление хода уровня воды оз. Ханка по историческим данным (пунктирная линия) за 1865–1912 гг. – по данным М. Г. Васьковского [1])

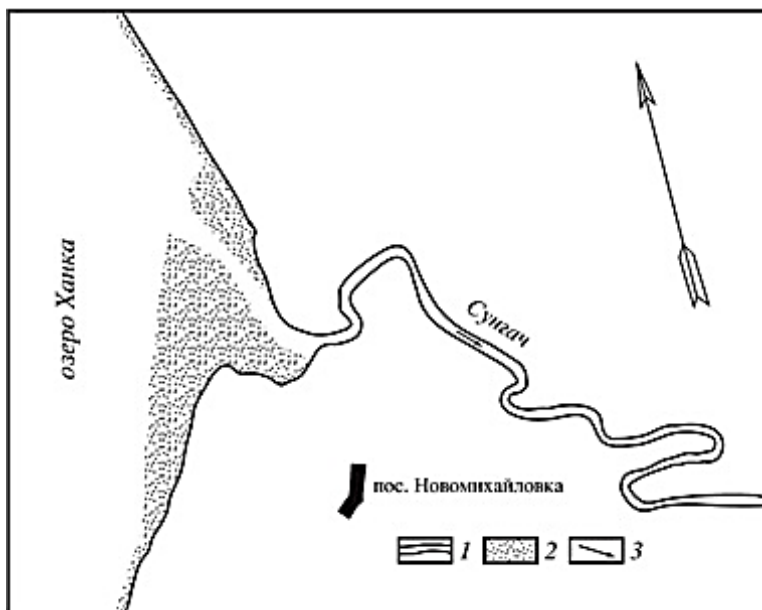


Рисунок 10.12 – Прибрежный бар оз. Ханка в истоках р. Сунгач: 1 – русло р. Сунгач; 2 – положение прибрежного бара; 3 – направление течения [124]

## 10.2 Оценка пропускной способности русла р. Сунгач, обусловленная его морфологическим строением

Как отмечалось выше, русло р. Сунгач врезано в древние озерные глинистые отложения, что определило и особенности русловых процессов данной реки, в частности, вертикальное врезание русла как доминирующей тенденции его развития.

На *рисунке 10.13* представлен продольный профиль дна долины реки в верхнем течении. Средний уклон дна на участке от истока до створа впадения Сунгачинского и Александровского каналов равен 0,266‰. При том, что общий уклон реки от истока до устья незначительный (0,034÷0,043‰). Именно общая тенденция вертикального врезания всего русла обуславливает характер его поперечного сечения на верхнем участке, влияющий на пропускную способность русла в пойменных бровках.

По данным измерений при среднем уровне озера 441 см над «0» поста расход воды в истоке реки составил 72,2 м<sup>3</sup>/с при ширине русла 74,9 м и площади поперечного сечения 233 м<sup>2</sup>.

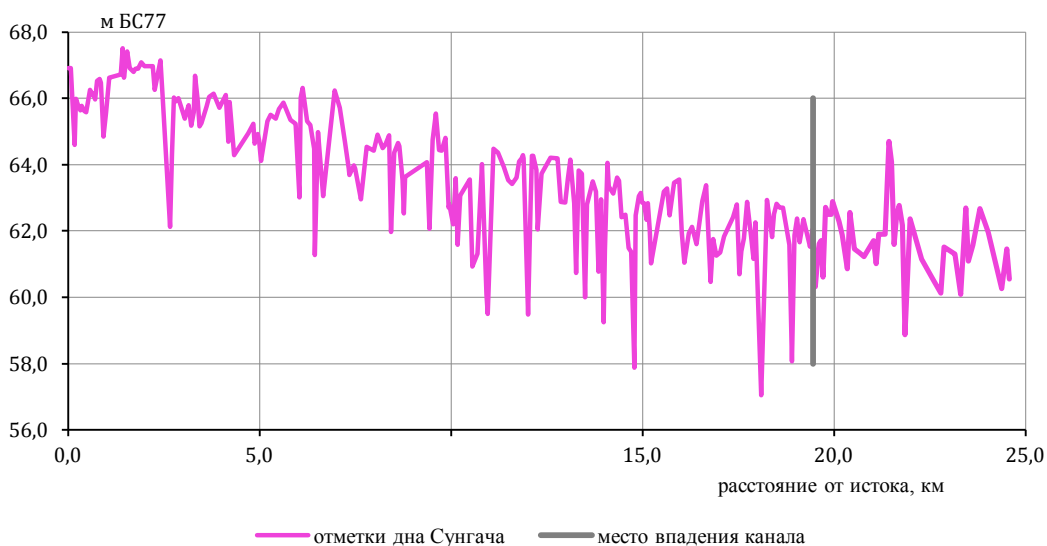


Рисунок 10.13 – Продольный профиль дна р. Сунгач

Важным для оценки пропускной способности русла реки является геологическое строение территории, по которой она протекает, и интенсивность русловых переформирований. Грунты, слагающие дно долины реки Сунгач, представлены преимущественно средними и тяжелыми суглинками, переслаиваемыми слоями торфа. Песчаная фракция в большинстве разрезов не вскрыта. Исключение составляет устьевой участок реки, приуроченный к долине р. Уссури, сложенной песчано-галечным аллювием.

Такое геологическое строение дна долины определило не только форму речных излучин, но и незначительность стока донных руслоформирующих наносов

с соответствующим отсутствием в русле реки каких-либо внутрирусловых грядовых образований, влияющих на пропускную способность русла.

Полученные результаты исследований современных русловых деформаций позволяют говорить об абсолютном преобладании на р. Сунгач стабильных берегов, не подверженных в настоящее время размыву (более 80 %), а наиболее яркие формы проявления естественных процессов руслоформирования – спрямления излучин, – только лишь увеличивают пропускную способность русла реки.

Именно эти особенности руслоформирования реки Сунгач определяют пропускную способность речного русла как в целом, так и в различные фазы водного режима.

При этом известно, что пропускная способность речного русла определяется общими гидравлическими сопротивлениями движению водного потока в руслах, которые складываются из следующих составляющих:

- гидравлических сопротивлений, вызываемых зернистой шероховатостью дна, т. е. гранулометрическим составом донных наносов;
- гидравлических сопротивлений, обуславливаемых грядовым движением донных наносов;
- дополнительных гидравлических сопротивлений, обуславливаемых формой речного русла (отношением ширины к глубине потока В/Н), наличием излучин, рельефом дна и формой затапливаемого дна долины [126], [127].

Следует заметить, что каждое из дополнительных гидравлических сопротивлений может иметь весьма существенное и даже доминирующее влияние на пропускную способность русла.

Исходя из составляющих геологического строения дна долины и особенностей процессов руслоформирования, выражающихся в отсутствии донных руслоформирующих наносов, общие гидравлические сопротивления на верхних участках реки определяются грансоставом донных наносов и формой речного русла и речных излучин.

Поскольку русло врезано в глинистые и суглинистые озерные отложения, грансостав донных наносов не меняется год от года и по сезонам в зависимости от интенсивности транспорта донных наносов. Стабильность речных излучин также свидетельствует о том, что пропускная способность русла реки не изменилась за последние 20 лет.

При оценке пропускной способности русла р. Сунгач важным обстоятельством является наличие самого высокого (в абсолютных высотных отметках) переката в вершине и в пределах нижнего крыла вытянутой излучины, расположенной на расстоянии 2,4 км от истока реки (*рисунки 10.14 и 10.15*). Данный перекат, как и все речное русло реки, имеет стабильное морфологическое строение и, следовательно, его влияние на пропускную способность русла реки не изменяется от года к году.

В период проведения полевых изысканий в 2016 г. глубина на этом перекате

составила 2,4 м, в то время, как в остальном русле она составляла 3,5–8,0 м. При этом надо отметить, что роль данного переката, оказывающего существенное влияние на пропускную способность русла реки при прохождении половодий в пределах пойменных бровок, резко снижается после выхода воды на пойму.

Для оценки потенциальной пропускной способности русла реки на участке от указанного лимитирующего переката до створа впадения Александровского и Сунгачинского каналов по материалам полевых изысканий 2016 г. были выполнены приближенные расчеты расхода воды, который может пройти по руслу реки в пределах пойменных бровок в равномерном режиме движения, т.е. без фактически наблюдаемого подпора уровней воды.

Если по книге В. Т. Чоу [128] для данного участка р. Сунгач как для «малой равнинной реки с чистым извилистым руслом с омутами и отмелями» принять значение коэффициента шероховатости равным 0,040, то расчеты расхода воды, который может пройти по руслу в пределах пойменных бровок при ширине 35 м и глубине 2,5 м при равномерном режиме движения воды (без подпора), выполненные по формулам Шези и Маннинга, дают величину расхода воды 65,4 м<sup>3</sup>/с, которая вполне коррелирует с величинами измеренных расходов воды в прежние годы.

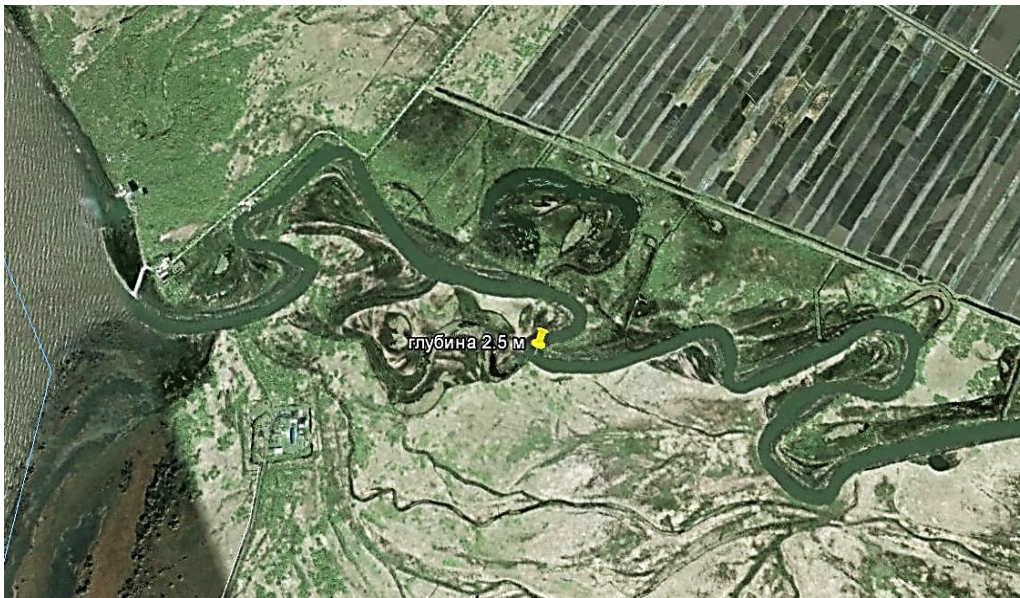


Рисунок 10.14 – Плановое положение излучины, в вершине которой располагается лимитирующий сток реки перекал



Рисунок 10.15 – Прибрежный бар в истоке реки

Еще одним морфологическим элементом, способным оказать ощутимое влияние на пропускную способность русла р. Сунгач в ее истоке, является упоминавшийся выше прибрежный бар оз. Ханка, прикрывающий речной исток (рисунок 10.12). По устным свидетельствам сотрудников Ханкайского биосферного заповедника в последнее время после прекращения в 1970-е годы регулярной срезки бара, вход в русло Сунгача занесен песком и стволами упавших деревьев.

Выполненные в 2016 г. промеры глубин на баре показали, что лимитирующая сток воды в реку Сунгач наименьшая глубина на баре составляет 2,0–2,5 м. Это сопоставимо с глубиной реки на основном лимитирующем перекате (2,4 м) при том же уровне воды в озере. Очевидно, что существенное воздействие этого прибрежного бара на сток воды по руслу реки проявляется при уровнях воды в реке в пределах пойменных бровок и снижается при затопленной пойме и при затопленных прибрежных территориях.

Таким образом, анализ морфологического строения русла реки Сунгач и прибрежных участков озерного дна в истоке реки показал, что основными морфологическими элементами, лимитирующими сток воды из озера при половодьях с максимальными расходами воды 50%-ной обеспеченности, являются:

- стационарный суглинистый перекат в русле реки с высотными отметками 67,6 м БС77, расположенный в пределах излучины на расстоянии 2,4 км от истока;
- и прибрежный бар с изменяющимися высотными отметками, расположенный на озерном дне в истоке реки.

В периоды стояния высоких уровней воды в озере при затопленных прибрежных озерных территориях и затопленной речной пойме влияние этих морфологических элементов на пропускную способность речного русла заметно снижается.

Но в эти периоды особое значение приобретают гидравлические факторы и условия стекания воды с затопленной поймы и затопленных прибрежных территорий.

Анализ измеренного в 2016 г. профиля свободной поверхности воды и профиля речного дна по фарватеру реки (рисунок 10.16) показал, что глубины реки по мере движения вниз по течению возрастают на перекатах с 2,5 м до 5–6 м, средний уклон дна реки на участке от истока до створа впадения Сунгачинского и Александровского каналов равен 0,266‰, а уклон свободной поверхности воды – 0,085‰, т. е. в 3 раза меньше среднего уклона дна, но в два раза больше уклона свободной поверхности воды на участке от истока реки до указанного выше лимитирующего переката. При этом продольный профиль свободной поверхности воды слегка выполаживается вплоть до створа впадения в русло реки Александровского и Сунгачинского каналов, сбрасывающих в речной поток воды с затопленных прибрежных территорий. Ориентировочно расход этих сбрасываемых вод составляет около 15 м<sup>3</sup>/с.

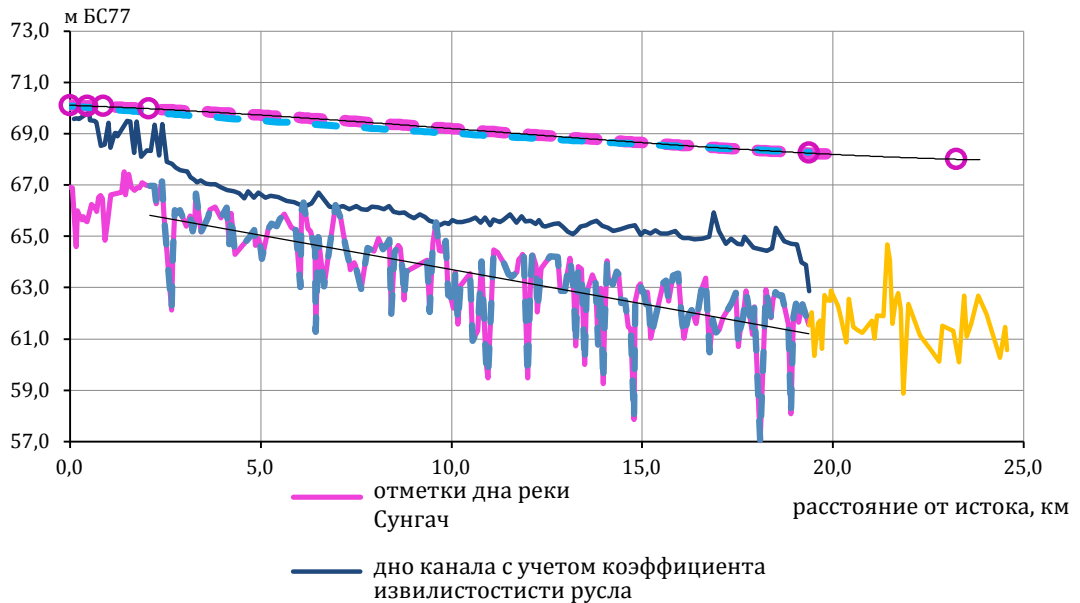


Рисунок 10.16 – Совмещенные профили свободной поверхности воды и дна по фарватеру р. Сунгач и Сунгачинского канала

В гидравлике такой профиль свободной поверхности воды называют кривой подпора [78]. Как видно на представленном рисунке, этот подпор распространяется вплоть до истока реки и, следовательно, снижает расходы воды, истекающие из озера по речному руслу, перераспределяя их в пользу затопленных прибрежных территорий и речной поймы.

По приближенным тестовым гидравлическим расчетам с использованием гидравлической математической модели, выполненным Болговым М. В., показано, что при расходе воды в речном русле 50 м<sup>3</sup>/с сброс дополнительных объемов воды

в створе впадения Александровского канала в объеме  $10 \text{ м}^3/\text{с}$  вызывает указанное наблюдаемое явление подпора и снижает расход воды в речном русле на  $4\text{--}5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Таким образом, точечный сброс паводочных вод с затопленных территорий и из Сунгачинского канала по Александровскому каналу в русло реки Сунгач является значимым гидравлическим фактором, влияющим на пропускную способность русла реки в ее истоке.

Еще одним фактором, способным усилить подпор уровней воды, вызванный стоком из каналов, является пережат в русле реки высотой  $1,6 \text{ м}$  с отметкой  $64,7 \text{ м}$  БС 77, расположенный в  $3 \text{ км}$  ниже по течению от створа впадения каналов ( $22 \text{ км}$  от истока) в пределах спрямления излучин, которое произошло до 1940 г.

Количественная оценка пропускной способности русла реки Сунгач непосредственно в ее истоке, т.е. в створе, расположенном выше по течению от лимитирующего пережата, была выполнена по данным полевых экспериментальных работ 2016 г. Ее результаты представлены в разделе 6.6. Анализ *рисунка 6.31* показывает, что при уровне  $69,5 \text{ м}$  БС 77 (уровень выхода воды на пойму реки) расход воды непосредственно в ее истоке составляет  $68,6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Это вполне согласуется с приведенными выше расчетами расхода воды на участке от верхнего лимитирующего пережата до створа впадения каналов. В условиях равномерного движения воды при уровне выхода воды на пойму, этот расход составил  $65,4 \text{ м}^3/\text{с}$ . Большие расходы воды должны проходить при уровнях воды, превышающих уровень выхода воды на пойму, когда происходит смена факторов, определяющих пропускную способность русла реки.

Таким образом, в ходе выполненного анализа гидравлических условий в русле реки Сунгач установлено, что без выхода воды на пойму речное русло способно пропускать расходы воды  $65,4\text{--}68,6 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом основными морфологическими элементами, лимитирующими сток воды из озера при половодьях с максимальными расходами воды 50%-ной обеспеченности, являются стационарный суглинистый пережат с отметкой  $67,6 \text{ м}$  БС 77, расположенный в пределах излучины на расстоянии  $2,4 \text{ км}$  от истока реки, и прибрежный бар с изменяющимися высотными отметками, расположенный на озерном дне в истоке реки.

В периоды стояния высоких уровней воды в озере при затопленных прибрежных озерных территориях и затопленной пойме реки влияние этих морфологических элементов на пропускную способность речного русла заметно снижается. При таких уровнях воды основным фактором, обуславливающим пропускную способность русла реки Сунгач, является гидравлический подпор уровней воды, вызываемый точечным сбросом паводочных вод с затопленных территорий и из Сунгачинского канала по Александровскому каналу в русло р. Сунгач. Гидравлический подпор усиливается наличием в русле реки лимитирующего пережата высотой  $1,6 \text{ м}$  с отметкой  $64,7 \text{ м}$  БС 77, расположенного в  $3 \text{ км}$  ниже по течению от створа впадения каналов ( $22 \text{ км}$  от истока) в пределах спрямления излучин.

### 10.3 Оценка пропускной способности русла Сунгачинского канала, обусловленная его морфологическим строением

Сунгачинский межхозяйственный магистральный канал расположен в 2 км южнее истока реки Сунгач. От истока и на протяжении 500 м, канал имеет ширину 30 м, глубину по фарватеру от 0,5–1,0 м. На данном участке по обоим берегам имеются намыв грунта из оз. Ханки. В 500 м от истока канала расположены мост и земляная дамба. Ниже моста на расстоянии 50 м русло канала перегорожено земляной перемычкой шириной 5 м. Глубина канала от моста до перемычки 0,3–1,0 м. В настоящее время перемычка на половину размыта и вода протекает по правобережной пойме. Ниже насыпи после впадения протоки канал на протяжении 8 км имеет четко выраженное прямолинейное русло шириной 30 м и глубиной 3 м на период изысканий.

Таким образом, пропускная способность Сунгачинского канала в истоке ограничена мелководным участком длиной 1,2 км с глубинами 0,3–1,0 м и лимитирующими отметками дна 68,5–69,4 м БС 77, в пределах которого расположен мостовой переход и перегораживающая канал земляная перемычка (рисунок 10.17).

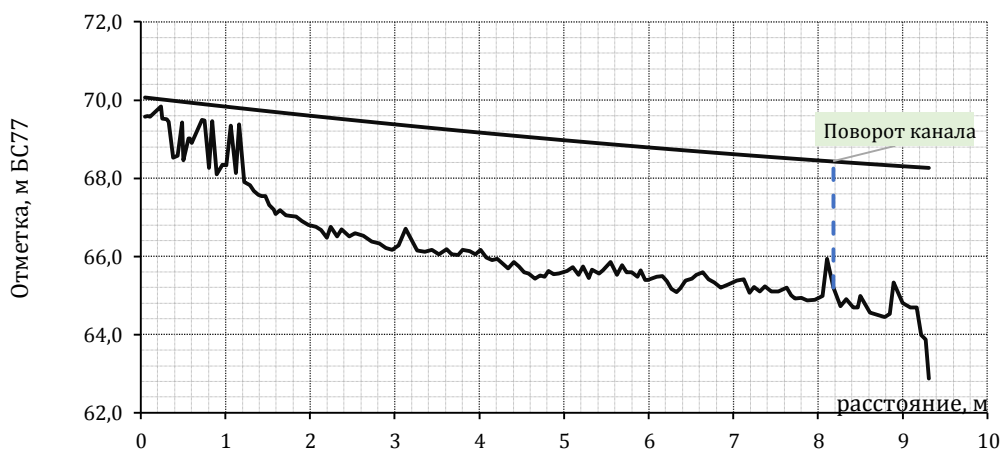


Рисунок 10.17 – Продольный профиль дна Сунгачинского канала

После прямолинейного 8-километрового участка канал поворачивает на северо-восток и через 1 км впадает в р. Сунгач. В месте поворота Сунгачинского канала и в месте соединения Александровского канала с рекой Камышовка заложены водопропускные трубы. Таким образом, пропускная способность Сунгачинского и Александровского каналов ограничена водопропускной способностью этих двух труб.

Как показано в разделе 6.7, пропускная способность Сунгачинского канала и при низких, и при высоких уровнях воды в оз. Ханка определяется не его морфометрическими характеристиками, а хаотическими инженерными сооружениями и



мероприятиями в его истоке и водопропускной трубой в его устье. При этом обеспечивается пропуск расхода воды всего лишь  $10,6 \text{ м}^3/\text{с}$ .

По данным наблюдений за морфологическим строением дна, выполненным в 2016 г., продольный уклон дна канала от створа земляной перемычки до водопропускной трубы составляет  $0,344\%$ . Если в соответствии с В. Т. Чоу [128] для Сунгачинского канала, как для канала «с неоднородными откосами и дном, заглубленным в озеритовую глину, с откосами, покрытыми небольшими деревцами и кустарников», принять значение коэффициента шероховатости равным  $0,045$ , то расчетная величина расхода воды в пределах пойменных бровок при ширине  $30 \text{ м}$  и глубине  $2 \text{ м}$  при равномерном режиме движения воды (без подпора) по формулам Шези и Маннинга составляет  $42 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Таким образом, в настоящее время само русло канала обладает достаточной пропускной способностью, чтобы пропускать без выхода воды на пойму расходы воды до  $42 \text{ м}^3/\text{с}$ . Это позволяет использовать современное русло канала (без лимитирующих его пропускную способность хаотических инженерных сооружений) в качестве регулирующего уровня воды в озере Ханка инженерного сооружения.

Выполненная оценка пропускной способности канала без названия (см. выше раздел 6.7) показала, что при современном уровне в озере расход воды в нем составляет около  $3,0 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### 10.4 Предложения по уменьшению многолетней амплитуды колебаний уровня озера путем регулирования стока по водоотводящим каналам и р. Сунгач

Как уже указывалось выше, основными морфологическими элементами, лимитирующими пропускную способность русла реки Сунгач при расходах вод меньших или равных среднемноголетним максимальным (до выхода воды на пойму) являются следующие:

- прибрежный бар в оз. Ханка, прикрывающий исток реки Сунгач, динамика которого определяется режимом вдольберегового транспорта донных наносов в озере, зависящим от доминирующей розы ветров и уровня в озере;

- устойчивый лимитирующий пережат с отметками  $67,6 \text{ м БС } 77$ , расположенный на расстоянии  $2,4 \text{ км}$  от истока реки в пределах крутой излучины.

После выхода воды на пойму, т.е., при расходах воды, превышающих среднемноголетние максимальные, лимитирующими пропускную способность русла реки факторами являются:

- подпор уровней воды, вызываемый точечным сбросом воды с речной поймы и затопленных прибрежных территорий, огражденных дамбой Александровского каналов, по Сунгачинскому и Александровскому каналам, который происходит в створе, расположенном на расстоянии  $18 \text{ км}$  от истока реки;

- лимитирующий перекат с высотными отметками 64,7 м БС, расположенный на расстоянии 22 км от истока реки в пределах спрямления излучины, произошедшего до 1940 г.

По результатам приближенных гидравлических расчетов, выполненных по формулам Шези и Маннинга, расход воды в пределах пойменных бровок при ширине русла 35 м и глубине 2,5 м, при равномерном движении воды (без подпора) составляет 65,4 м<sup>3</sup>/с, что вполне коррелирует с величинами измеренных расходов воды в прежние годы.

Как показано выше, русло Сунгачинского канала при современных характеристиках обладает достаточной пропускной способностью для использования его в качестве инженерного сооружения, регулирующего уровни воды в оз. Ханка. По результатам приближенных гидравлических расчетов, выполненных по формулам Шези и Маннинга, расход воды, который может пройти по руслу канала в пределах пойменных бровок на 8-ми километровой его участке без инженерных сооружений при ширине русла 3 м и глубине 2 м при равномерном режиме движения воды (без подпора) равен 42 м<sup>3</sup>/с. На участке же в истоке канала по материалам этих расчетов при современном уровне воды расход воды равен всего лишь 2 м<sup>3</sup>/с.

Выполненные приближенные гидравлические расчеты показывают, что при прохождении расходов воды в пределах пойменных бровок (без выхода воды на пойму) современное русло р. Сунгач без лимитирующих перекатов совместно с современным руслом Сунгачинского канала без лимитирующих инженерных сооружений и хаотических перемычек в его русле могут обеспечить пропуск расхода воды 107 м<sup>3</sup>/с. С уверенностью можно предполагать, что этой потенциально возможной величины расхода воды вполне достаточно для регулирования уровня воды в озере при всех вариантах водохозяйственной деятельности на китайской территории.

Таким образом, задачей системы мер по регулированию стока из оз. Ханка становится изменение морфологических элементов или гидравлических явлений в руслах р. Сунгач и Сунгачинского канала, лимитирующих пропускную способность этих русел. Такая система регулирования стока из озера должна включать в себя следующие первоочередные мероприятия:

- ликвидацию всех сооружений и перемычек в русле Сунгачинского канала на 1,2-километровом участке в его истоке до отметки 68,5 м БС, что обеспечит пропуск 13 м<sup>3</sup>/с при среднемноголетнем максимальном уровне воды в озере;

- инженерную организацию сброса воды с затапливаемых прибрежных территорий по Сунгачинскому и Александровскому каналам рассредоточенно вдоль русла реки на максимально возможную (с экономической точки зрения) длину с обязательным перенесением створа основного сброса воды ниже лимитирующего переката, расположенного в русле Сунгача в 22 км от истока реки (в 3 км ниже от современного створа сброса воды из каналов).

Для разработки такой комплексной инженерной системы сброса воды с затапливаемых прибрежных территорий и по Сунгачинскому каналу необходимо провести детальные полевые геодезические и гидрологические изыскания по обоим каналам и по руслу реки Сунгач на участке не менее 50–60 км. Это позволит оценить пропускную способность русла реки вплоть до среднего ее течения для оценки зон затопления прибрежных территорий при повышенных расходах воды.

## 11. Оценка эффективности мероприятий по регулированию уровня озера Ханка

Оценка эффективности мероприятий по регулированию уровня озера Ханка выполнена путем использования динамико-стохастической модели многолетних колебаний уровня воды в оз. Ханка, рассмотренной в главе 9 монографии и результатов гидродинамического моделирования движения воды в руслах вытекающих водотоков.

### 11.1 Разработка гидравлической модели гидрографической сети

Модель формирования поверхностного стока в русловой части вытекающей из озера р. Сунгач включает регулирование стока с водосбора с использованием емкости оз. Ханка его трансформацию по системам каналов, включая естественные участки русел.

Для расчета гидрологического режима поверхностных водных объектов на урбанизированной территории использован программный комплекс SWMM (модель управления ливневым стоком). Данный комплекс включает в себя несколько модулей, но на данном этапе применен только один из них – модуль под названием EXTRAN, который реализует алгоритм решения уравнения Сен-Венана для системы открытых и закрытых (напорных и безнапорных) водоводов и водотоков.

Модуль EXTRAN представляет собой Фортран-программу, предназначенную для численного решения системы уравнений, описывающих движение воды в системе открытых (безнапорных) и закрытых водотоков и водоводов. EXTRAN-блок получает входной гидрограф в специальных узлах через интерфейсный файл из гидрологического блока (RUNOFF-блок) и/или путем непосредственного ввода пользователем.

Второй метод реализован в данной задаче. Модель выполняет динамический расчет потока воды по всей системе с верхних точек до точек выхода (принимающей водной системы). Программа позволяет моделировать древовидные или замкнутые сети, безнапорные и напорные потоки, обратные течения, переброску потоков с помощью плотин, водоводов и насосных станций, управляемых и неуправляемых емкостей. Возможен учет различных форм поперечных сечений труб: круглые, прямоугольные, подковообразные, в форме яйца или корзины. Каналы могут быть трапециевидные, параболические или естественные русла произвольной формы. При моделировании р. Сунгач использовались представление участков русел в виде каналов трапециевидного сечения с различным заложением откосов и шероховатостью.

Перечисленные выше возможности SWMM позволят при проектировании системы учесть дополнительные гидравлические сопротивления, возникающие при пересечении дорог, устройстве труб, шлюзов-регуляторов и пр.

Результатом моделирования являются профили водной поверхности и расходы воды в заданных точках системы.

Гидравлическая система, воспроизводимая модулем EXTRAN, представляется в виде набора элементов в основном двух типов: соединительные узлы и линейные элементы (водоводы). Узлы могут идентифицироваться как верхние концевые точки системы, выходные точки и точки с заданным расходом, морские граничные условия; насосные станции, емкости, отведение дамбами и водоотводами, узлы, где принимается входной гидрограф, соединение каналов и труб, точки, где размеры или форма каналов и труб, а также их уклон, меняются существенно.

Основное дифференциальное уравнение, используемое в задаче описания потоков в системе, получено из уравнения не сильно меняющегося, одномерного нестационарного потока для открытых каналов, известного, как уравнение Сен-Венана или уравнение мелкой воды. Уравнение неразрывности для неустановившегося потока представляется в виде:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (11.1)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения;  $Q$  – расход воды в трубе (водоводе);  $x$  – координаты по длине трубы;  $t$  – время.

Уравнение движения может быть записано в нескольких формах в зависимости от выбора зависимых переменных. Используя расход  $Q$  и гидравлический напор (падение плюс глубина воды)  $H$ , уравнение движения запишется в виде:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0, \quad (11.2)$$

где  $g$  – гравитационная константа;  $H = Z + h$  – гидравлический напор;  $Z$  – падение;  $h$  – глубина воды;  $S_f$  – уклон (энергия) трения. Уклон дна включен в градиент  $H$ . EXTRAN использует уравнение движения для линейных элементов и уравнение неразрывности для узлов. Решение конечно-разностного аналога уравнения движения осуществляется с помощью итерационной процедуры.

Входные данные программы EXTRAN содержат информацию, управляющую выполнением программы, выбор единиц измерения, надо или нет модифицировать длины коротких труб, площади колодцев, число итераций и допустимую ошибку в условиях переполнения и итерационных вычислений.

Отдельная группа данных описывает каналы и водоводы, включая форму, размер, длину, гидравлическую шероховатость, соединяемые узлы, начальные расходы воды и высотное положение дна канала по отношению ко дну узловой точки, а также нерегулярные поперечные профили (естественные русла).

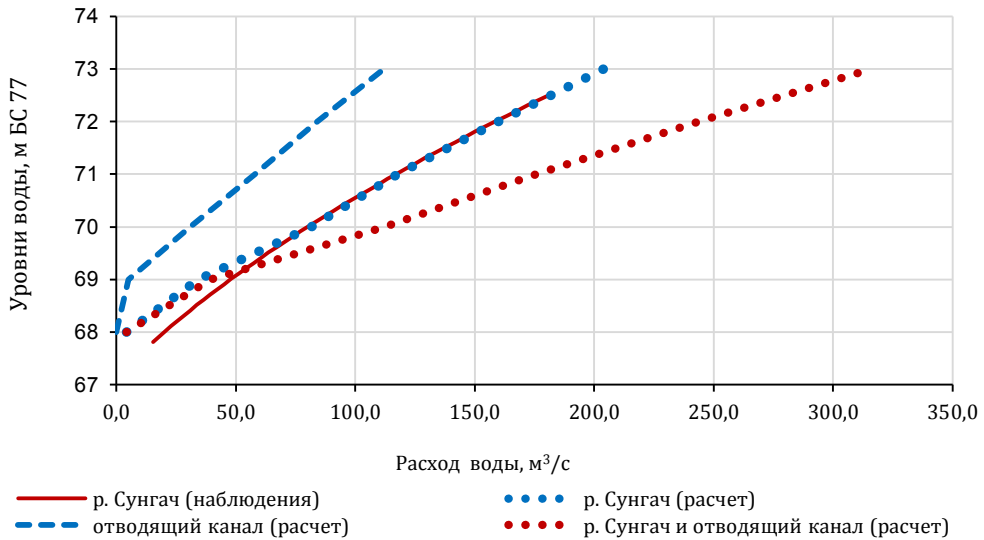


Рисунок 11.1 – Карта-схема расположения основных узлов расчетной сетки гидродинамической модели

Карта-схема расположения основных узлов расчетной сетки гидродинамической модели для русла р. Сунгач и Сунгачнского канала представлена на *рисунке 11.1*. Необходимые для задания расчетной сетки параметры заданы на основе материалов выполненных изысканий, результатов исследований пропускной способности и проектных оценок параметров будущих сооружений.

С использованием описанной выше гидродинамической модели получена зависимость стока воды из оз. Ханка от его уровня при реализации различных мероприятий (*рисунке Рисунок 11.2*). Для решения уравнений Сен-Венана задавались следующие граничные условия: сверху – уровень воды в оз. Ханка, который моделируется емкостью, сосредоточенной в одной точке, и задается постоянным; снизу – уровень воды в р. Усури, являющейся водоприемником для р. Сунгач, назначаемый переменным в соответствии с наблюдаемым.

Как следует из *рисунка 11.2* расчеты пропускной способности русла по гидродинамической модели дают приемлемые результаты в диапазоне уровня 69–72 м. При более низких уровнях результаты модельных расчетов и эмпирическая кривая расходятся. Следует, однако, отметить, что при уровнях воды в озере более 70,1 м измерений расходов воды в р. Сунгач не производилось, поэтому надежность экстраполяции эмпирической кривой расходов в зону больших уровней невысока. Реконструкция (дноуглубление) дополнительного канала приведет к увеличению суммарной пропускной способности отводящих сток канала и русла, и, соответственно, к уменьшению уровня воды в озере.



*Рисунок 11.2* – Расчетные и эмпирическая зависимости расхода от уровня оз. Ханка Q(H) для: отводящего канала, р. Сунгач и суммарная

Полученные на основе гидродинамической модели зависимости расхода от уровня используются далее при оценке эффекта от принятых мероприятий по увеличению пропускной способности Сунгачинского канала с помощью имитационных расчетов на основе динамико-стохастической модели.

При этом учитывается, что в состав мероприятий по увеличению пропускной способности Сунгачинского канала входит углубление русла канала до отметки 68,5 м БС77 и ликвидация всех хаотических пересыпок русла канала на участке длиной 1,2 км в его истоке и реконструкция узла слияния р. Сунгач, сбросного и мелиоративного каналов.

## 11.2 Имитационные эксперименты по оценке эффективности мероприятий по регулированию уровня оз. Ханка

Оценка эффекта предлагаемых мероприятий на регулирование уровня оз. Ханка выполнена с использованием кривой пропускной способности, смоделированных продолжительных рядов элементов водного баланса и имеющихся сведений о регулировании стока на китайской территории. Имитационное моделирование выполнено для 4-х вариантов мероприятий (*таблица 11.1*).

*Таблица 11.1*

Варианты различных мероприятий по регулированию уровня оз. Ханка

Вариант	Название мероприятия
1	Сокращение поступления стока р. Мулинхэ в Малую Ханку
2	Расчистка русла Сунгачнского канала в его истоке до отметки дна 68,5 м БС 77 на выходе из озера и реконструкция узла слияния каналов с р. Сунгач
3	Расчет с учетом климатических изменений
4	Расчет с учетом безвозвратных изъятий

*Вариант 1.* Одна из причин современного роста уровня оз. Ханка – это переброска стока р. Мулинхэ в бассейн оз. Малая Ханка и затем в оз. Ханка по системе каналов, емкостей и ГТС. Переброска осуществляется в целях борьбы с наводнениями в низовьях р. Мулинхэ и для обеспечения водой РОС. Перебрасываемая вода частично подается на РОС и затем в основном сбрасывается в р. Сунгач. Оставшийся сток накапливается в оз. Малая Ханка, и при превышении некоторого заданного уровня воды в Малой Ханке сбрасывается в оз. Ханка, приводя к росту его уровня. Таким образом, первое мероприятие заключается в сокращении непосредственного сброса паводочных вод в озеро и перенаправлении части паводочного стока непосредственно в р. Сунгач.

Выполненные водохозяйственные расчеты показывают (*таблица 11.2*), что в результате перераспределения перебрасываемого паводочного стока между оз. Малая Ханка и р. Сунгач наблюдается некоторое снижение расчетных уровней воды в озере.

Однако надо признать, что надежные данные о стоке р. Мулинхэ отсутствуют, гидравлические параметры каналов, емкостей и сооружений, расположенных на китайской территории, а также режимы эксплуатации всей системы известны ориентировочно. Результаты расчетов, выполненных при разработке динамико-стохастической модели и в данном разделе, показали, что негативное воздействие переброски стока на уровеньный режим оз. Ханка весьма существенно. Таким образом, китайской стороне может быть предъявлено требование об изменении режимов эксплуатации водохозяйственной системы с целью минимизации негативного воздействия на российскую часть побережья озера.



Результаты моделирования для различных проектных вариантов по регулированию уровня воды в оз. Ханка

Параметры распределения уровня	Варианты (в соответствии с таблицей 4.1)			
	1	2	3	4
Средний уровень озера, м	69,39	69,05	69,31	68,68
Коэффициент асимметрии, $C_s$	0,26	0,28	0,32	-0,08
Среднее квадратическое отклонение, $\sigma$	0,65	0,54	0,57	0,60
$r(1)$	0,83	0,73	0,73	0,76
Средний расход р. Сунгач, $Q$ , м <sup>3</sup> /с	54,4	54,6	68,9	36,2
Расчетные значения уровня оз. Ханка, $H$ , м				
0,1%	71,62	70,94	71,31	70,64
1,0%	71,02	70,42	70,75	70,10
5,0%	70,50	69,99	70,29	69,68
10%	70,24	69,76	70,05	69,43
20%	69,93	69,50	69,78	69,17
50%	69,36	69,02	69,28	68,68
80%	68,83	68,56	68,82	68,21
90%	68,56	68,38	68,59	67,96
95%	68,32	68,21	68,43	67,72
99%	68,02	67,91	68,15	67,14

*Вариант 2.* Второй возможный подход к регулированию уровня воды в озере заключается в увеличении пропускной способности каналов и водотоков, осуществляющих сброс воды из оз. Ханка. Р. Сунгач является трансграничным водным объектом, и поэтому для этой цели рекомендуется восстановление пропускной способности Сунгачинского канала, полностью располагающегося на российской территории. Само мероприятие заключается в расчистке головной части канала, непосредственно примыкающей к оз. Ханка, до отметки 68,5 м БС77, расчистке его основного русла до ширины 30 метров и глубины 2,0 метра при уровне воды до выхода воды на пойму и в реконструкции узла слияния р. Сунгач, сбросного канала и мелиоративного канала. Эффект от восстановления пропускной способности Сунгачинского канала весьма существенен, особенно для высоких уровней малой обеспеченности. Расчетные 1%-ные уровни снижаются на 60 см, средние многолетние уровни – примерно на 30 см, минимальные уровни меняются мало. Последнее обстоятельство связано с тем, что канал начинает работать с отметок воды в Ханке, начиная с 68,5 м БС77 и выше.

*Вариант 3.* Третий вариант расчетов показывает влияние возможных изменений климата на результаты оценки эффективности предлагаемых мероприятий. Учет климатических изменений выполнен путем корректировки параметров распределений элементов водного баланса озера в соответствии с принятыми в главе 8.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что изменения климата приведут к росту уровней воды в озере, особенно максимальных.

Дополнительная характеристика уровня режима оз. Ханка может быть дана с помощью характеристик выбросов случайного процесса, т.е. времени стояния уровня выше заданного значения. В *таблице 11.3* приведено число выбросов заданной продолжительности в пересчете на 1000 лет. Данные свидетельствуют о весьма вероятном (обеспеченность около 5 %) нахождении уровня озера в течение ряда лет выше отметки 70 м БС77.

*Таблица 11.3*

Число выбросов заданной продолжительности выше заданного уровня для основного расчетного варианта (расчистка русла канала)

Уровень	Продолжительность, годы			
	10	11-25	26-50	51-100
70,14	61,1	5,7	0,3	0,01
69,87	65,9	8,9	1,1	0,03
69,60	67,1	12,5	2,3	0,14

*Вариант 4.* Четвертый вариант расчетов учитывает величину безвозвратных изъятий в объеме 0,55 км<sup>3</sup> в год. Это максимальная величина, которая может быть достигнута через 10–12 лет. Принятое значение величины изъятий было учтено при выполнении имитационных расчетов для рассмотренного ранее основного расчетного случая (с реконструкцией сбросного канала). Результаты расчетов приведены выше в *таблице 11.2*. Как следует из результатов расчета, как средний уровень оз. Ханка, так и уровни заданной (малой) обеспеченности при учете объемов безвозвратного водопотребления существенно уменьшаются. Таким образом, развитие водоемких производств, в первую очередь рисосеяния, может рассматриваться в качестве мероприятия, способствующего снижению средних и максимальных уровней воды в оз. Ханка. Проблема заключается в том, что объемы сельскохозяйственного производства должны быть существенно увеличены, а это возможно только в долгосрочной перспективе.

По результатам исследования предложенных вариантов можно сделать следующий вывод. Наиболее эффективный подход к регулированию уровня воды в озере заключается в увеличении пропускной способности каналов и водотоков, осуществляющих сброс воды из оз. Ханка в р. Сунгач. Р. Сунгач является трансграничным водным объектом, и изменение ее русла требует длительных процедур согласования с учетом норм международного права и специфики двухсторонних отношений, и поэтому рекомендуется восстановление пропускной способности

существующего канала, который полностью располагается на российской территории. Рекомендуется расчистка головной части канала (углубление до отметки 68,5 м), расчистка основного русла и в реконструкция узла слияния р. Сунгач, сбросного и мелиоративного каналов. При реализации этих мероприятий расчетные уровни воды в озере 1 % обеспеченности снижаются на 60 см, средние многолетние уровни – примерно на 30 см.

## Заключение

Многолетние данные по водному балансу оз. Ханка свидетельствуют о доминирующей роли гидрометеорологических факторов в изменениях его уровня. Их вклад в современное повышение уровня воды составляет 82 %. В последние десятилетия, наряду с климатическими, отмечается разнонаправленное влияние на ход уровня антропогенных факторов. Так, интенсивное развитие орошаемого земледелия на китайской части бассейна озера, осуществляемое за счет переброски части стока р. Мулинхэ, сопровождалось дополнительным поступлением воды в оз. Малая Ханка с последующим сбросом в многоводные годы в оз. Ханка, являлось фактором дополнительного повышения уровня в 2000–2015 гг. Повышению уровня оз. Ханка способствовало и уменьшение пропускной способности р. Сунгач и Сунгачинского канала. Совокупный вклад хозяйственной деятельности в современном повышении уровня оценен в 18 %.

Вероятностный прогноз уровня воды в оз. Ханка, полученный на перспективу 30–50 лет, показал, что доверительный интервал вероятностного прогноза при всех сценариях водопользования достаточно большой. Средние значения уровня и максимальные уровни обеспеченностью 1 % могут отличаться для разных вариантов на величину до одного метра. Моделирование в сочетании с оценками пропускной способности русел показало, что колебания уровня озера в существенной мере зависят от условий стока из него, что и определило направление разработки мероприятий по снижению максимальных уровней воды в оз. Ханка.

Мероприятиями по регулированию уровня оз. Ханка (в настоящее время направленными, прежде всего, на его понижение) являются сокращение объемов стока р. Мулинхэ, поступающих в оз. Малая Ханка и затем в оз. Ханка за счет перераспределения непосредственно в р. Сунгач и увеличение пропускной способности водотоков, по которым происходит сток воды из оз. Ханка. Наиболее эффективна совместная реализация этих мероприятий. Однако с учетом того, что позиция китайской стороны по вопросам перераспределения части паводочного стока р. Мулинхэ неизвестна, а согласование этого вопроса может занять длительное время, оптимальной представляется система мер, включающая расчистку русла Сунгачинского канала на входном участке для доведения его пропускной способности до современной пропускной способности русла всего канала и реконструкцию сбросного участка Сунгачинского и Александровского каналов с переносом точки их сопряжения с руслом р. Сунгач, а также периодическую расчистку прибрежного бара на акватории оз. Ханка и приустьевых участках р. Сунгач и Сунгачинского канала. Оценки последствий реализации данной системы мер и степени ее воздействия на уровеньный режим озера показывают их высокую эффективность.

Следует иметь в виду, что в результате естественной климатической изменчивости могут формироваться серии маловодных, засушливых лет в течение которых приток рек в озеро и осадки, выпадающие на его поверхность, будут существенно меньше многолетней нормы, а испарение с его акватории выше, что приведет к резкому снижению уровня. Дополнительному понижению уровня в такие периоды будет способствовать подача воды из Ханка в оз. Малая Ханка с использованием действующей насосной станции для последующего использования для орошения рисовых систем на китайской части бассейна. Продолжительное низкое стояние уровня воды озера нанесет значительный вред экологии и экономике региона. В период регрессии уровня усилится процесс эвтрофикации озера, произойдет деградация водно-болотных угодий, возникнут проблемы с обеспечением водозаборов. Это говорит о том, что при планировании мероприятий по регулированию уровня воды оз. Ханка путем увеличения его расходных составляющих в многоводные периоды, следует предусмотреть необходимость ограничения или полного прекращения стока из озера по водоотводящим каналам при длительных маловодьях.

## Список литературы

- 1 Васьяковский М. Г. Гидрологический режим озера Ханка. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 175 с.
- 2 История Ладожского, Онежского, Псковско- Чудского озер, Байкала и Ханки. – Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1990. – 280 с.
- 3 Зайков Б. Д. Водный баланс и уровень Аральского моря в связи со строительством Главного Туркменского канала // Тр. ГГИ. – 1952. – Вып. 016. – 43 с.
- 4 Серпик Б. И. Водные ресурсы рек Южного Приморья Дальнего Востока. Гидрометеорологическое издание. – Л.: Гидрометеоиздат, 1955. – 177 с.
- 5 Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня и экологические угрозы. – Владивосток, Дальнаука, 2016. – 286 с.
- 6 Занина А. А. Дальний Восток. Серия «Климат СССР». Вып. 6. – Л.: Гидрометеоиздат, 1958. – 167 с.
- 7 Тропические циклоны, БД Гидрометцентра России <http://www.meteoinfo.ru/tropicyclones>(дата обращения: 19.05.2016 г.).
- 8 Tropical Cyclone Information, JMA, <http://www.jma.go.jp/en/typh/> (дата обращения: 29.05.2016 г.).
- 9 Мохов И. И., Добрышман Е. М., Макарова М. Е. Трансформирование тропических циклонов во внетропические: тенденции изменений в 1970–2012 гг. – Доклады АН, 2014, т. 454, №2, С. 216–220.
- 10 Кондратьев К. Я., Вандышева Н. В., Козодеров В. В., Косолапов В. С. Оценка параметров почвенно-растительного покрова по многоспектральным спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 1992. № 3. С. 88–95.
- 11 Cui Jin, Xiangming Xiao and et. Mapping paddy rice distribution using multi-temporal Landsat imagery in the Sanjiang Plain, Northeast China // *Frontiers of Earth Science*. March 2016. Vol. 10 (1). P. 49–62.
- 12 Yuanwei Qin, Xiangming Xiao, Jinwei Dong, Yuting Zhou, Zhe Zhu, Geli Zhang, Guoming Du, Cui Jin, Weili Kou, Jie Wang, Xiangping Li. Mapping paddy rice planting area in cold temperate climate region through analysis of time series Landsat 8 (OLI), Landsat7 (ETM+) and MODIS imagery // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. July 2015. Vol. 105. P. 220–233. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.04.008.
- 13 Primstat.gks.ru (Электронный ресурс). URL: <http://primstat.gks.ru> (дата обращения: 20.05.2016 г.)
- 14 Официальный сайт администрации Приморского края (Электронный ресурс). URL: <http://prim.ru> (дата обращения: 31.05.2016 ).
- 15 Народное хозяйство Приморского края за 1966–1970 годы: ст. сб. – Владивосток: Приморстат, 1972. – 407 с.
- 16 Приморье в X пятилетке: ст. сб. – Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1982. – 96 с.

- 17 Проблемы рисосеяния российского Дальнего Востока. – Владивосток, Изд-во Дальневосточного университета, 1999. – 192 с.
- 18 Волгина О. А. Состояние и перспективы развития рисовых культур в Приморском крае/ О. А. Волгина, Е. Г. Гусев, Е. Н. Лихошерст//Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2013, вып. № 5 (23). – С. 51–60.
- 19 Криволапов И. Е. Рис на Дальнем востоке /И. Е. Криволапов. – Владивосток: Владивостокское книжное издательство, 1971. – 135 с.
- 20 Бортин Н. Н., Горчаков А. М. Причины экстремально высокого уровня воды трансграничного озера Ханка. – Водное хозяйство России, 2016. С. 62–84.
- 21 Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши/ Часть 1–3, Т. 2, вып. 21. Бассейн Уссури и рек Японского моря, Владивосток: Приморское УГМС, 1980–2015 г.
- 22 Возродить производство риса. – Электронный ресурс; <http://www.pkokprf/info/5153>(дата обращения: 20.05.2016 г.)
- 23 Ратникова И. П. Использование иностранной рабочей силы в Приморском крае. – Вестник ДВО РАН, 2007. №4, С. 119–121.
- 24 Иващенко П. Своего риса в Приморье станет больше (Электронный ресурс). URL: <http://novostiv.ru/msg/>(дата обращения: 18.05.2016 г.)
- 25 Паспорта гидротехнических сооружений Приморского края. Департамент мелиорации Минсельхоза Российской Федерации (Электронный ресурс):URL: <http://mcx-dm.ru/gts> (дата обращения 31.05.2016 г.)
- 26 Отчет «Доработка проекта СКИВО по бассейну р. Амур». ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (РосНИИВХ) – Екатеринбург, 2012. – 108 с.
- 27 Носовский В. С. Совершенствование организации управления развития производства риса в Приморском крае / В. С. Носовский, С. В. Носоский, Б. А. Золотов// Известия ДВФУ экономики и управления, 2015. №3. С.42–53.
- 28 Неунывалов Б. А. Использование земель под рис и состояние рисосеяния на Дальнем Востоке / Б. А. Неунывалов, В. И. Ознобихин, А. С. Тур. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. – 34 с.
- 29 Отчет «Доработка проекта СКИВО по бассейну р. Амур». ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (РосНИИВХ)- Екатеринбург, 2012. – 108с.
- 30 Романова Н. В., Корликов А. С. Исследование возможности использования коллекторно-сбросных вод для орошения риса в Приморском крае – Дальневосточный государственный технический университет (ДВГТУ) – Владивосток, 2007. – (Электронный ресурс). URL: [http://www.rusnauka.com/SND\\_2007/Agricole/18043.doc.htm](http://www.rusnauka.com/SND_2007/Agricole/18043.doc.htm) (дата обращения 30.05.2016 г.).
- 31 Губарева Е. Л. Развитие и современная динамика русла реки Сунгачи / Сборник работ МГПУ. – С.50–59.

- 32 Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 200 с.
- 33 Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 552 с.
- 34 Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 18. Дальний Восток. Вып. 3. Приморье. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 624 с.
- 35 Викулина З. А. Водный баланс озер и водохранилищ Советского Союза. Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 175 с.
- 36 Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том. 1. Вып. 21. Бассейны Уссури и рек Японского моря. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 387 с.
- 37 Водные ресурсы СССР и их использование. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 302 с.
- 38 Водные ресурсы России и их использование /под ред. И. А. Шикломанова. - СПб., Государственный гидрологический институт, 2008. – 600 с.
- 39 Юргенсон Р. О. О судоходном состоянии реки Амура с притоками // Зап. Приамурского отд. ИРГО. – 1897. Т. 3. Вып. 2. – С. 1–100.
- 40 Водные ресурсы и их использование, ГВК, ДСП № 1985. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 303 с.
- 41 Свод правил. СП 33-101-2003. – 2004. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
- 42 Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. – Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. – 134 с.
- 43 Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. – СПб.: Нестор-История, 2009. – 193 с.
- 44 HydroStatCalc – 2011. Руководство пользователю. Программные средства автоматизации гидрологических расчетов для изученных и недостаточно изученных бассейнов [http://www.hydrology.ru/metodic/manual\\_2010.pdf](http://www.hydrology.ru/metodic/manual_2010.pdf). (дата обращения: 20.05.2016 г.)
- 45 Справочник по водным ресурсам СССР. Т. 18. Дальне-Восточный район. Ч. 2. Вып. 2. – Л.: ГГИ, 1939. – 392 с.
- 46 Васьковкий М. Г. К расчету водного баланса оз. Ханка // Тр. ДВНИГМИ. – 1970. Вып. 31. – С. 54–62.
- 47 Методические указания. Устранение неоднородности между рядами дождемерных и осадкомерных наблюдений. – Л.: Гидрометеоздат, 1964. – 25 с.
- 48 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). – ФГБУ «ГГИ», СПб, 2016. – 296 с.
- 49 Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 89. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 96 с.
  - 50 Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю. Устранение неоднородности временных рядов осадков вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова // Метеорология и гидрология. – 2008. № 8. – С. 87–102.
  - 51 Богданова Э. Г., Голубев В. С., Ильин Б. М., Драгомилова И. В. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах РФ // Метеорология и гидрология. – 2002. № 10. – С. 68–93.
  - 52 Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. – Л.: Гидро-метеиздат, 1969. – 83 с.
  - 53 Тимофеев М. П. Метеорологический режим водоемов. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 291 с.
  - 54 Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли / под. ред. В. И. Корзун – Л.: Гидрометеиздат, 1974 – 637 с.
  - 55 Меженная И. В. Опыт применения метода теплового баланса для расчета испарения с поверхности оз. Ханка // Тр. ДВНИГМИ. 1988. Вып. 135. – С. 44–47.
  - 56 Постников А. Н. Оценка норм испарения за безледоставный период с озер и водохранилищ России и отдельных стран СНГ методом теплового баланса // Ученые записки РГГМУ. – 2012. № 26. – С. 25–33.
  - 57 Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н., Разуваев В. Н. Изменение режима ветра на территории России в последние десятилетия // Труды ГГО. – 2013. Вып. 568. – С. 156–172.
  - 58 Кобышева Н. В., Степанская Г. А., Чмутова З. Е. О точности расчета климатических характеристик ветра для научно-прикладного справочника по климату СССР // Тр. ГГО. – 1983. Вып. 475. – С. 55–60.
  - 59 РД 52.04.275-89. Методические указания. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. Утвержден Государственным комитетом СССР по Гидрометеорологии. <https://docs.cntd.ru/document/1200036768?ysclid=19y3celkre90835963/>(дата обращения: 19.05.2016 г.).
  - 60 СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействие. – М.: Минрегионразвития РФ, 2011. – 90 с.
  - 61 Рекомендации по расчетам водного баланса крупных озер и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 99 с.
  - 62 Методы изучения и расчета водного баланса /под ред. А. А. Соколова/. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 397 с.
  - 63 Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 96 с.

- 64 Кузьмин П. П. О расчетном и экспериментальном способах определения испарения с поверхности снежного покрова // Тр. ЗабНИГМИ. – 1974. Вып. 58. – С. 25–43.
- 65 Иверонова М.И. Испарение со снежного покрова на хребте Терской-Алатау.Сб. География снежного покрова Изд-во АН СССР, – М., 1960. – С. 151–173.
- 66 Методы расчета водных балансов. Международное руководство по исследованиям и практике/под. ред. А. А. Соколов, Т. Г. Чапмен. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 120 с.
- 67 Голубев В. С., А. П. Урываев. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов // Труды ГГИ. – 1983. Вып. 289. – С. 69–76.
- 68 В. С. Голубев., К. В. Цыценко, Н. Л. Соляник. Динамика потерь стока с поверхности водохранилищ Кура-Араксинского бассейна // Метеорология и гидрология. – 1989. № 69. – С. 103–109.
- 69 Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, I том. Изменения климата. – 227 с.; II том. Последствия изменений климата. – М.: Изд. Росгидромета, 2008. – 288 с.
- 70 IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller.
- 71 Сперанская Н. А. Потенциально возможное и видимое испарение и его изменения на Европейской части России за последние 50 лет (по экспериментальным данным) // Водные ресурсы. – 2016. - Т. 43. № 6. – С. 661–672.
- 72 Сперанская Н. А., Фуксова Т. В. Многолетние изменения основных составляющих водного режима озера Ханка // Метеорология и гидрология. – 2018. № 8. – С. 53–64.
- 73 Караушев А. В. Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. – Л.: Гидрометеоздат. – 216 с.
- 74 Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 55. – Л.: Гидрометеоздат, 1960. – 52 с.
- 75 Васьковский М. Г. Многолетние колебания годового стока рек Приморья // Тр. ДВНИГМИ. – 1968. Вып. 27.– С. 3–14.
- 76 Найденов В. И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. – М.: Наука, 2004. – 320 с.
- 77 Материалы по гидрологии Дальневосточного края./ Т. 1. – Владивосток, 1930. – 360 с.
- 78 Чугаев Р. Р. Гидравлика. Учебник для вузов.- Л.: Энергоиздат, 1982, – 672 с.
- 79 Xiangcan J., Jiang Xia. Experience and lessons learned brief for lake Xingkai/Khanka// Материалы международной конференции «Состояние и перспективы российско-китайского сотрудничества в области охраны окружающей среды и управления водными ресурсами». – М. 2007. – С. 81–108.

- 80 Гидрологический ежегодник, Т. 9, вып. 6. Бассейн р. Усури и бассейн Японского моря, Владивосток: Приморское УГМС, 1960–1979 гг.
- 81 Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши/ Часть 1–3, Т.2, вып.21. Бассейн Усури и рек Японского моря, Владивосток: Приморское УГМС, 1980–2015 гг.
- 82 Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 90. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 103 с.
- 83 Анисимов О. А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу/ О. А. Анисимов, В. А. Кокорев // Лед и Снег. – 2013. – Т. 121. №1. – С. 83–92.
- 84 Кокорев В. А. Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России / В. А. Кокорев, О. А. Анисимов // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. – М.: Планета. – 2013. –Т. 25. – С. 131–153.
- 85 Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S. C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason, and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of climate models. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, Eds. Cambridge University Press, pp. 741–882.
- 86 Riahi K., Rao S., Krey V. et al. RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // Climatic Change. – 2011. – Vol. 109. – P. 33–57.
- 87 Masui T., Matsumoto K., Hijioka Y. et al. An emission pathway for stabilization at 6 Wm<sup>-2</sup> radiative forcing // Climatic Change. – 2011. – Vol. 109. – No. 1–2. –P. 59–76.
- 88 Thomson A. M., Calvin K.V., Smith S. J., et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // Climatic Change. – 2011. – Vol. 109. – P. 77–94.
- 89 Van Vuuren D. P., Stehfest E., den Elzen M. G. J. et al. RCP2. 6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C // Climatic Change. – 2011. – Vol. 109. – P. 95–116.
- 90 IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contributing of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.). Cambridge, United Kingdom and New Yo.
- 91 Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K. et al. Technical Summary // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge: Cambridge Unive.
- 92 Knutti R. The end of model democracy? // Climatic Change. – 2010. – Vol. 102. – P. 395–404.

- 93 Anisimov O. A., Kokorev V. A., Ziltcova E. L. Temporal and Spatial Patterns of Modern Climatic Warming: Case Study of Northern Eurasia // *Climatic Change*. – 2013. – Vol. 118. – №3. – P. 871–883.
- 94 Raisanen J., Ylhaisi J. S. How Much Should Climate Model Output Be Smoothed in Space? // *Journal of Climate*. – 2011. – No. 3. – P. 867–880.
- 95 Анисимов О. А. Об оценках изменений климата регионов России в 20 и начале 21 веков по данным наблюдений / О. А. Анисимов, Е. Л. Жильцова // *Метеорология и гидрология*. – 2012. – № 6. – С. 95–107.
- 96 Всемирная программа исследований климата: [http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/IPCC\\_](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/IPCC_) (дата обращения: 15.07.2016).
- 97 Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: Причины, прогнозы, рекомендации. Сборник докладов М.: Росгидромет, 2014. – 207 с.
- 98 Национальная лаборатория Лоуренса Ливермора: <http://pcmdi9.llnl.gov/> (дата обращения: 15.07.2016).
- 99 Хлебникова Е. И. Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России / Е. И. Хлебникова, И. А. Салль // *Метеорология и гидрология*. – М.: 2009. № 7. – С. 5–13.
- 100 IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)*. IPCC, 2014: Geneva, Switzer.
- 101 Мещерская А.В. Изменение климата Забайкалья во второй половине XX века по данным наблюдений и ожидаемые его изменения в первой четверти XXI века / А. В. Мещерская и др. // *Труды ГГО*, – 2009, Вып. 559. – С. 32–57.
- 102 Баранова А.А. Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине XX века / А. А. Баранова, М. П. Голод, А. В. Мещерская // *Труды ГГО*. – 2007. Вып. 556. – С. 116–138.
- 103 Мелешко В. П. Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 / В. П. Мелешко и др. // *Метеорология и гидрология*. – 2008. № 4. – С. 5-21.
- 104 Прогноз научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года / Минсельхоз России; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2017. – 140 с.
- 105 Водная стратегия агропромышленного комплекса России на период до 2020 г. – М.: Изд. ВНИИА, 2009. – 72 с.
- 106 "О стратегии социально-экономического развития развития Приморского края до 2025 г.: закон Приморского края от 20.10.2008 г. №324-КЗ – URL:<http://pravo.gov.ru/> - (дата обращения 20.05.16)".
- 107 Постановление Правительства РФ от 14.07.2012 № "О Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной

- продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы": – URL:<http://pravo.gov.ru/> - (дата обращения 20.05.2016).
- 108 Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» – URL <http://www.rcit.ru/techinfoF3.html?ysclid=19y5ocjz808564112> - (дата обращения 20.05.16).
- 109 О развитии мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 гг.: постановление Правительства Российской Федерации от 12.10.2013 № 922 – URL:<http://pravo.gov.ru/> – (дата обращения 20.05.16).
- 110 Носовский В. С., Некрас Ю. В. Состояние и перспективы развития рисосеяния на Дальнем Востоке / В. С. Носовский, Ю. В. Некрас// Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. №4. – С. 2–5.
- 111 Глаз Н. В. Состояние и развитие сельского хозяйства в субъектах до 2025 г. – Электронное научное издание «Ученые записки ТОГУ». – 2014. Том 5. № 3. – С. 166–182.
- 112 Березников К. П. Гидроэкологические обоснования площадей рисосеяния в бассейне оз. Ханка / К. П. Березников, К. П. Бобрик, А. И. Степанова/ – Владивосток: ДВО РАН СССР, – 1977. – С. 194–196.
- 113 Баканов К. Г. Многолетний режим уровня озера Ханка : дисс. канд. техн. наук. ИВП АН ССР, М., 1988. – 127 с.
- 114 Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. – М: Наука, 1968. – 460 с.
- 115 Тихонов В. И. Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.
- 116 Сарманов О. В. Исследование стационарных Марковских процессов методом разложения по собственным функциям // Труды МИАН, 1961. – Т. 60. – С. 238–261.
- 117 Багров Н. А. Аналитическое представление последовательностей метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих //Труды ЦИП, 1959. Вып. 74. – С. 3–27.
- 118 Болгов М. В. Моделирование многомерных гидрологических характеристик методом разложения по естественным ортогональным функциям //Метеорология и гидрология, 1994. – № 7. – С.82–95.
- 119 Фаддеев Д. К. Вычислительные методы линейной алгебры/ Д. К. Фаддеев, В. Н. Фаддеева. – М.: Физматгиз, 1963. – 734 с.
- 120 Короткий А. М. Озерные трансгрессии в позднекайнозойской Усури-Ханкайской депрессии (Приморье) /А. М. Короткий, Т. А. Гребенникова, Л. П. Караулова, Н. И. Белянина// Тихоокеанская геология. – 2007. Т. 26. № 4. – С. 53–68.
- 121 Короткий А. М., Караулова Л. П., Белянин Н. И., Павлюткин Б. И. Четвертичные озерные трансгрессии в Усури-Ханкайской впадине // Позднекайнозойская история озер в СССР. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1982. – С. 114–117.

- 122 Никольская В. В. Некоторые данные о палеогеографии озера Ханка // Труды Института географии АН СССР. – 1952. – Т. 51. – С. 215–225.
- 123 Чалов Р. С., Завадский А. С., Панин А. В. Речные излуины. М.: изд-во МГУ. 2004. – 371 с.
- 124 Губарева Е. К. Развитие и современная динамика русла реки Сунгач // Геоморфология, 2015. №4. – С. 50–59.
- 125 Лоция реки Уссури. Изд-во министерства обороны СССР. Гидрографическое управление. – 1971. –133 с.
- 126 Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 182 с.
- 127 Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты / Сб. работ по гидрологии / под ред. Георгиевского В. Ю. – ФГБУ «ГГИ», СПб, ООО «ЭсПэХа», 2015. – С. 152–168.
- 128 Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 464 с.

## Содержание

Предисловие .....	3
1. <b>Общая характеристика озера и его бассейна</b> (В. В. Костко) .....	5
2. <b>Многолетние колебания уровня озера Ханка и его влияние на социально-экономические условия прибрежных территорий</b> (В. Ю. Георгиевский, П. А. Голосовский, В. В. Костко).....	11
3. <b>Климатические условия бассейна озера Ханка</b> (О. А. Анисимов, И. И. Борзенкова, В. А. Кокорев, Е. Л. Жильцова, М. Е. Макарова, Т. В. Бережная, Н. В. Панкратенко, И. Н. Куликова, А. В. Смирнов, А. Б. Скомсков, Е. В. Татаринovich, Ю. А. Медведева) 22	
3.1 Факторы, определяющие климатический режим в Южном Приморье и в бассейне озера .....	22
3.2 Термический режим Приханкайской низменности и района озера Ханка.....	30
3.3 Режим осадков в бассейне озера. ....	33
4. <b>Морфометрические характеристики озера Ханка</b> .....	42
4.1 Результаты полевых инженерно-гидрологических и морфометрических работ (В. А. Иванов, Т. М. Аксянов, Р. И. Шкарбанов) .....	42
4.2 Оценка современных морфометрических характеристик озера Ханка (С. А. Журавлев, Л. С. Курочкина) .....	47
5. <b>Хозяйственная деятельность в бассейне озера Ханка и на сопредельных территориях</b> .....	58
5.1 Оценка развития водохозяйственного комплекса по данным спутниковой информации (Л. С. Крамарева, А. Н. Давиденко, В. В. Суханова, Ю. А. Попкова, Ю. А. Шамилова, А. В. Харитоновна, Л. А. Слесаренко, З. Н. Лотарева, А. А. Филей) .....	58
5.1.1 Исходные спутниковые данные и алгоритм их получения .....	59
5.1.2 Методика выделения на изображениях границ рисовых оросительных систем .....	61
5.1.2.1 Методика выделения рисовых полей .....	61
5.1.2.2 Расчет площадей РОС и рисовых чеков на них, залитых водой .....	63
5.1.3 Анализ многолетней динамики площадей орошения риса на китайской территории. ....	66
5.2 Хозяйственная деятельность на российской части бассейна озера Ханка (Ж.А. Балонишников, К.В. Циценко) .....	84
5.2.1 Общая характеристика социально-экономических условий .....	84
5.2.2 Использование водных ресурсов в бассейне озера Ханка .....	85
5.2.2.1 Развитие и состояние орошаемого земледелия .....	86
5.2.2.2 Динамика развития орошения по данным спутниковой информации .....	89
5.2.2.3 Полное и безвозвратное водопотребление в бассейне озера Ханка .....	91
5.2.3 Гидротехнические сооружения и мелиоративные системы, обеспечивающие хозяйственную деятельность в бассейне озера Ханка (П. А. Голосовский, В. В. Костко) .....	94
5.3 Хозяйственная деятельность на китайской части бассейна озера Ханка и сопредельных территориях (А. Л. Шалыгин, М. В. Болгов) .....	99
5.3.1 Описание водохозяйственной системы КНР.....	99
6. <b>Составляющие водного баланса озера Ханка и их определения</b> .....	108
6.1 Приток речных вод (Е. А. Грек) .....	108
6.2 Подземный приток (А. Л. Шалыгин) .....	121
6.3 Осадки (Н. А. Сперанская, Т. Г. Молчанова) .....	122
6.4 Испарение (Н. А. Сперанская, Т. В. Фуксова) .....	127
6.5 Уровень воды (Л. П. Алексеев) .....	149
6.6 Сток из озера по реке Сунгач (Т. И. Яковлева) .....	156
6.7 Сток из озера по водоотводящим каналам (Т. И. Яковлева) .....	167

6.8	Водообмен с озером Малая Ханка (А. Л. Шалыгин) .....	169
6.9	Эпизодические переливы из озера Ханка (Л. П. Алексеев) .....	173
7.	<b>Водный баланс озера Ханка и причины современного повышения его уровня</b> (В. Ю. Георгиевский, Т. Г. Молчанова) .....	178
7.1	Водный баланс озера Ханка за период 1949–2015 гг. . . . .	178
7.2	Оценка точности (погрешности) составления водного баланса (Т. И. Яковлева) .....	190
7.3	Анализ зависимостей элементов водного баланса от метеорологических факторов ....	193
7.4	Влияние хозяйственной деятельности в бассейне озера на многолетнюю динамику его уровня .....	198
7.5	Оценка вклада гидрометеорологических и антропогенных факторов в современное повышение уровня озера.....	199
8.	<b>Сценарии гидрометеорологических условий и развитие водохозяйственной деятельности в бассейне озера</b> .....	201
8.1	Сценарии гидрометеорологических условий на ближайшие 30 лет .....	201
8.1.1	Сценарии изменения приземной температуры воздуха и осадков в бассейне озера (О. А. Анисимов, В. А. Кокорев, Е. Л. Жильцова).....	201
8.1.2	Сценарии изменения <u>стока рек в бассейне озера</u> (М. В. Георгиевский, <u>О. Ф. Голованов</u> ) .....	204
8.1.3	Сценарии изменения испарения с поверхности озера (Н. А. Сперанская, Т. В. Фуксова) .....	208
8.2	Сценарии развития водохозяйственной деятельности (Ж. А. Балонишникова, К. В. Циценко).....	213
8.2.1	Сценарии развития водоемких отраслей экономики .....	213
8.2.2	Оценка безвозвратного водопотребления в бассейне озера Ханка на перспективу до 2030 г. ....	216
9.	<b>Вероятностный прогноз изменения уровня озера Ханка</b> (М. В. Болгов).....	218
9.1	Динамико-стохастическая воднобалансовая модель многолетних колебаний уровня озера Ханка на основе статистических моделей элементов водного баланса озера ....	218
9.2	Одномерные стохастические модели составляющих водного баланса озера Ханка .....	219
9.3	Моделирование многомерных последовательностей компонент водного баланса озера с учетом взаимной корреляции.. ..	221
9.4	Результаты вероятностного прогнозирования уровня озера .....	222
10.	<b>Обоснование мероприятий по снижению уровня озера</b> .....	229
10.1	Оценка возможности изменения пропускной способности русла р. с учетом естественных русловых процессов(А. С. Завадский, А. В. Чернов) .....	229
10.1.1	История формирования пойменно-руслового комплекса .....	229
10.1.2	Современная морфология и динамика русла р.Сунгач .....	231
10.2	Оценка пропускной способности русла реки Сунгач, обусловленная его морфологическим строением (В. М. Католиков, Н. И. Католикова) .....	241
10.3	Оценка пропускной способности русла Сунгачинского канала, обусловленная его морфологическим строением (В. М. Католиков) .....	247
10.4	Предложения по уменьшению многолетней амплитуды колебаний уровня озера путем регулирования стока по водоотводящим каналам и р. Сунгач (В. М. Католиков) .....	248
11.	<b>Оценка эффективности мероприятий по регулированию уровня озера Ханка</b> (М. В. Болгов, Е. А. Коробкина, Е. С. Евдокимова) .....	251
11.1	Разработка гидравлической модели гидрографической сети. ....	251
11.2	Имитационные эксперименты по оценке эффективности мероприятий по регулированию уровня озера Ханка. ....	255
	Заключение .....	259
	Список литературы .....	261



Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

**Водный баланс озера Ханка  
и его изменения под влиянием природных и  
антропогенных факторов**

Под редакцией  
д-ра. геогр. наук В. Ю. Георгиевского

*Подписано в печать 03.12.2022 г.  
Формат 70 x 100 1/16  
Тираж 300 экз. Заказ № 20/12-22*

Дизайн, компьютерная верстка и печать ООО «РИАЛ»  
196655, Санкт-Петербург, Колпино, Вознесенское шоссе, 49/2-253