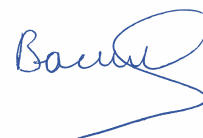


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Василевский Петр Юрьевич

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В
АРИДНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА (НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО
ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ХЭЙХЭ)**

Специальность 25.00.07 – гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Поздняков Сергей Павлович**,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент
- Официальные оппоненты** – **Куваев Андрей Алексеевич**,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент, Федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Гидроспецгеология», Центр объектного
мониторинга состояния недр, главный
специалист – начальник отдела ГИС-
технологий и математического
моделирования
- Болгов Михаил Васильевич**,
доктор технических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение
науки Институт водных проблем
Российской академии наук (ИВП РАН),
заведующий лабораторией моделирования
поверхностных вод
- Хаустов Александр Петрович**,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования «Российский
университет дружбы народов»,
экологический факультет, профессор
кафедры прикладной геологии

Защита диссертации состоится «21» мая 2021 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.04.01 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, РФ, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/360861498/>.

Автореферат разослан «14» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент

Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы связана с проблемой рационального использования водных ресурсов аридных территорий в условиях антропогенной нагрузки, а также деградации аридных экосистем [Rausch и др., 2012]. В настоящее время аридные территории занимают порядка 35% площади поверхности суши земного шара [Аридные территории, 2020], в том числе отдельные районы Российской Федерации и сопредельных стран. На этих территориях актуальна проблема дефицита водных ресурсов, решение которой невозможно без количественной оценки водообмена подземных и поверхностных вод. Подобная оценка на примере конкретного бассейна позволяет обосновать методику исследований для территорий со схожими природными и климатическими условиями.

В качестве **объекта исследования** выбран *бассейн Эйджина*, приуроченный к *нижнему течению реки Хэйхэ*, расположенному в Автономной Республике Внутренняя Монголия, КНР. Выбор объекта обусловлен его типичными природными и климатическими условиями, а также, практической необходимостью проведения исследования – в настоящее время район активно осваивается и нуждается в эффективных решениях по устойчивому водопользованию. **Предметом исследования** является взаимосвязь подземных и поверхностных вод в условиях аридного климата и антропогенного изменения поверхностного стока.

Бассейн Эйджина является частью межгорного артезианского бассейна Хэйхэ, который приурочен к обширной Гобийской депрессии. В условиях гипераридного климата фильтрация из русла реки Хэйхэ представляет собой основной источник питания подземных вод регионального грунтового водоносного комплекса, от положения уровня которого зависит возможность существования растительности в оазисе Эйджина. Увеличение отбора стока в средней части бассейна реки Хэйхэ в последние 50 лет привело к значительным геоэкологическим проблемам в его нижней части, таким как снижение уровня грунтовых вод и опустынивание оазиса Эйджина, а также полное исчезновение бессточных озер, в которые впадает река Хэйхэ [Wang и др., 2013]. Возможность дальнейшего освоения исследуемого района напрямую зависит от решения проблем устойчивого водопользования, среди которых важнейшее значение имеет водообмен в системе “водотоки – подземные воды – растительность”. Оценка условий и параметров взаимосвязи между поверхностными и подземными водами представляет собой ключевую задачу в рамках модельного обоснования решения геоэкологических проблем рассматриваемой территории.

Цель работы – оценка взаимосвязи подземных и поверхностных вод в нижнем течении реки Хэйхэ в связи с необходимостью устойчивого использования ограниченных водных ресурсов и решения геоэкологических проблем района.

Для достижения поставленной цели последовательно выполнялись следующие **задачи**:

1. Сбор, анализ и обобщение фондовых и опубликованных материалов о природных условиях, геологическом и гидрогеологическом строении бассейна нижнего течения р. Хэйхэ;

2. Проведение полевых исследований проницаемости донных отложений при помощи наливов в забивные пьезометры и обоснование методики их интерпретации;
3. Модельный анализ данных мониторинга уровней и температур подземных и поверхностных вод, температур вертикального профиля донных отложений для оценки параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод в локальном масштабе;
4. Обоснование параметров взаимосвязи поверхностных и подземных вод в региональном масштабе с помощью геогидрологической модели и выявление факторов, влияющих на водообмен в системе “водотоки – подземные воды – растительность”;
5. Разработка рекомендаций по регулированию поверхностного стока в нижнем течении р. Хэйхэ для поддержания устойчивого экологического состояния оазиса Эйджина на основе результатов прогнозного геогидрологического моделирования.

Методика исследований, личный вклад автора. Диссертация - результат исследований автора в течение 2015-2020 гг. в ходе обучения на кафедре гидрогеологии МГУ в магистратуре и аспирантуре. Автор непосредственно участвовал в полевых и лабораторных работах, планировал и обрабатывал результаты экспериментов и разработал серию моделей процессов водо- и теплообмена поверхностных и подземных вод разного масштаба.

Практическая значимость работы сводится к:

1. количественной оценке взаимосвязи подземных и поверхностных вод на опытном участке в нижнем течении р. Хэйхэ с помощью двух независимых методов;
2. оценке фильтрационных потерь из протяженного участка русла в нижнем течении р. Хэйхэ на основе геогидрологического моделирования;
3. выявлению факторов, влияющих на изменение фильтрационных свойств донных отложений и фильтрационные потери из русла реки Хэйхэ в ее нижнем течении;
4. обоснованию режима попусков в нижнее течение р. Хэйхэ для поддержания экологического состояния оазиса Эйджина.

Научная новизна работы.

1. Предложен метод обработки данных наливов речной воды в забивные пьезометры в донных отложениях, учитывающий процессы осаждения взвеси из фильтрующейся воды в процессе опыта.
2. Обоснована методика оценки скорости и направления водообмена подземных вод и пересыхающих водотоков с использованием данных мониторинга уровней подземных и поверхностных вод и профиля температур донных отложений.
3. На примере нижнего течения р. Хэйхэ показано, что температура и мутность речной воды являются основными факторами, влияющими на сезонную изменчивость взаимосвязи подземных и поверхностных вод в аридных условиях.

4. Получено новое аналитическое решение задачи фильтрации подземных вод в речной долине при их взаимодействии с несовершенным водотоком с учетом процесса испарения со свободной поверхности грунтовых вод.
5. На примере бассейна нижнего течения р. Хэйхэ предложен методический подход к калибровке региональной геогидрологической модели, основанный на использовании многолетних данных дистанционных наблюдений за динамикой площади бессточных озер, площади области эвапотранспирационной разгрузки подземных вод и величины эвапотранспирации в этой области.

По результатам проведенных исследований сформулированы следующие **защищаемые положения**.

1. При интерпретации результатов наливов речной воды в забивные пьезометры в донные отложения следует учитывать мутность воды, которая способна вызвать ухудшение фильтрационных свойств этих отложений в течение опыта из-за осаждения взвешенных в ней частиц. Диагностическим признаком этого процесса является нелинейный вид графика в координатах $\ln(S_0/S)$ от t . Для оценки коэффициента фильтрации донных отложений в этом случае следует использовать разработанную автором методику, основанную на модели линейного роста фильтрационного сопротивления за счет формирования слабопроницаемого осадка на поверхности донных отложений.
2. Для оценки параметров донных отложений на локальных участках с резко изменчивым внутригодовым режимом стока целесообразно использовать комплексный мониторинг температуры донных отложений, температур и уровней подземных и поверхностных вод. Обработка результатов этого мониторинга с помощью решения обратной задачи на математической модели тепловлагопереноса на временных масштабах проникновения суточных и годовых амплитуд колебаний температур позволяет определять динамику внутригодового водообмена подземных и речных вод. При этом, для аридного, резко континентального климата с годовыми колебаниями температуры речной воды 1-20 °С в расчетной модели тепловлагопереноса необходимо учитывать связь коэффициента фильтрации с вязкостью воды, зависящей от температуры. Неучет этой связи ведет к завышению расчетных фильтрационных потерь.
3. Интенсивность потерь речного стока на фильтрацию в аридных условиях при подпертом режиме взаимосвязи и близком залегании уровня грунтовых вод от поверхности зависит не только от фильтрационного сопротивления донных отложений и латерального потока подземных вод, но и от связи интенсивности испарения подземных вод с глубиной их залегания. На основе анализа упрощенной аналитической модели фильтрации подземных вод в речной долине введен безразмерный критерий α_r , характеризующий значимость влияния испарения и

донных отложений на фильтрационные потери. Для малых значений критерия α_r ($\alpha_r < 0.1$) параметры, определяющие интенсивность испарения подземных вод, оказывают более значимое влияние на фильтрационные потери, чем донные отложения. Для больших значений критерия α_r ($\alpha_r > 10$), потери из русла реки в большей степени определяются фильтрационным сопротивлением донных отложений.

4. Для региональной оценки взаимосвязи подземных и поверхностных вод в аридных условиях целесообразно использовать интегрированную геогидрологическую модель, учитывающую основные процессы водообмена в системе “водотоки – подземные воды – растительность”. Калибровать геогидрологическую модель следует с использованием не только прямой, но и косвенной информации, получаемой с помощью дистанционных наблюдений (динамика площади бессточных озер, испарение с поверхности земли), которая характеризует основные элементы водного баланса – водообмен между поверхностными и подземными водами и эвапотранспирационную разгрузку подземных вод. Для условий аридного бассейна Эйджина показано, что такой подход позволяет восстановить многолетнюю структуру водообмена поверхностных и подземных вод.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований, основные положения и проблемы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 9 публикациях, в том числе 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI.

Научные и практические результаты работы над диссертацией докладывались и обсуждались на ежегодных международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2016-2017 гг., 2019-2020 гг.), на научных семинарах Института географии и природных ресурсов Китайской Академии наук (КАН) в 2018 и 2019 гг.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав с разделами и подразделами и заключения. Общий объем работы составляет 166 страниц. Работа содержит 68 иллюстраций, 33 таблицы, список литературы из 167 наименований и 4 приложения.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю д.г.-м.н., доценту С.П. Позднякову за неоценимую помощь, поддержку, ценные советы на всех этапах выполнения работы. Автор глубоко признателен доценту института географии и природных ресурсов КАН, к.г.-м.н. Ван Пину за полезные советы и консультации, совместную работу и предоставление уникальных исходных данных, помощь в организации поездки и проведении полевых и лабораторных работ в КНР. Автор благодарен сотруднику упомянутого института Жангу за предоставление данных об изменении площади оазиса Эйджина за 2000-2017 гг. Также автор выражает благодарность профессору д.г.-м.н. С.О. Гриневскому и ведущему инженеру В.Н. Самарцеву за ценные советы и консультации по моделированию. Автор выражает большую благодарность полевой бригаде в составе сотрудников

кафедры гидрогеологии Геологического факультета МГУ научного сотрудника к.г.-м.н. Лехова В.А., ведущего инженера Самарцева В.Н., а также студентов и аспирантов Китайской Академии наук Лю Каи, Лю Шао, Ли Беи, Яффей, Тиане, Мин Лиу, Чао-Янг Ду за помощь в проведении полевых исследований. Результаты исследований поддерживались грантам РФФИ 15-55-53010, РФФИ 18-55-53025 и РФФИ 19-35-90014.

Автор особо признателен своей семье за поддержку и помощь на протяжении всего времени работы над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Часть I. Современное состояние исследований взаимосвязи подземных и поверхностных вод и характеристика изучаемого объекта

В первой главе проведен анализ современного состояния изученности проблемы взаимосвязи подземных и поверхностных вод в речных долинах в аридных условиях. Водообмен подземных и поверхностных вод является одним из ключевых процессов геогидрологического цикла [Кац, Шестаков, 1992; Шестаков и др., 2003]. Оценка и параметризация водообмена на разных масштабах рассматривалась в целом ряде работ включая [Kennedy и др., 2007; Desilets и др., 2008; Brunner и др., 2009; Гриневский, 2012; Leake и др., 2012; Villeneuve и др., 2015; Yao и др., 2015; Bastola и др., 2016; Grischek и др., 2016; Song и др., 2016; Tang и др., 2017] и др.

В результате проведенного обзора выявлено, что основная публикационная активность, связанная с решением теоретических, методических и практических задач взаимосвязи подземных и поверхностных вод аридных регионов, в последние десятилетия сосредоточена на следующих направлениях:

- Оценка процессов взаимосвязи водотоков и подземных вод в локальном масштабе с использованием локальных методов опробования и мониторинга температуры донных отложений;
- Изучение, параметризация и анализ масштабов взаимосвязанных процессов водообмена в системе “водоток – подземные воды – растительность”;
- Анализ формирования и использования ресурсов подземных вод в аридных условиях на основе геофильтрационного моделирования различного масштаба, отражающего основные процессы в системе “водоток – подземные воды – растительность”.

Во второй главе анализируются природные условия, геологическое и гидрогеологическое строение бассейна нижнего течения реки Хэйхэ, современное водопользование в нем.

Бассейн Эйджина расположен в Северо-Западном Китае, в низовье р. Хэйхэ (рис. 1) и является северным суббассейном межгорного артезианского бассейна Хэйхэ [Барановская, 2018].

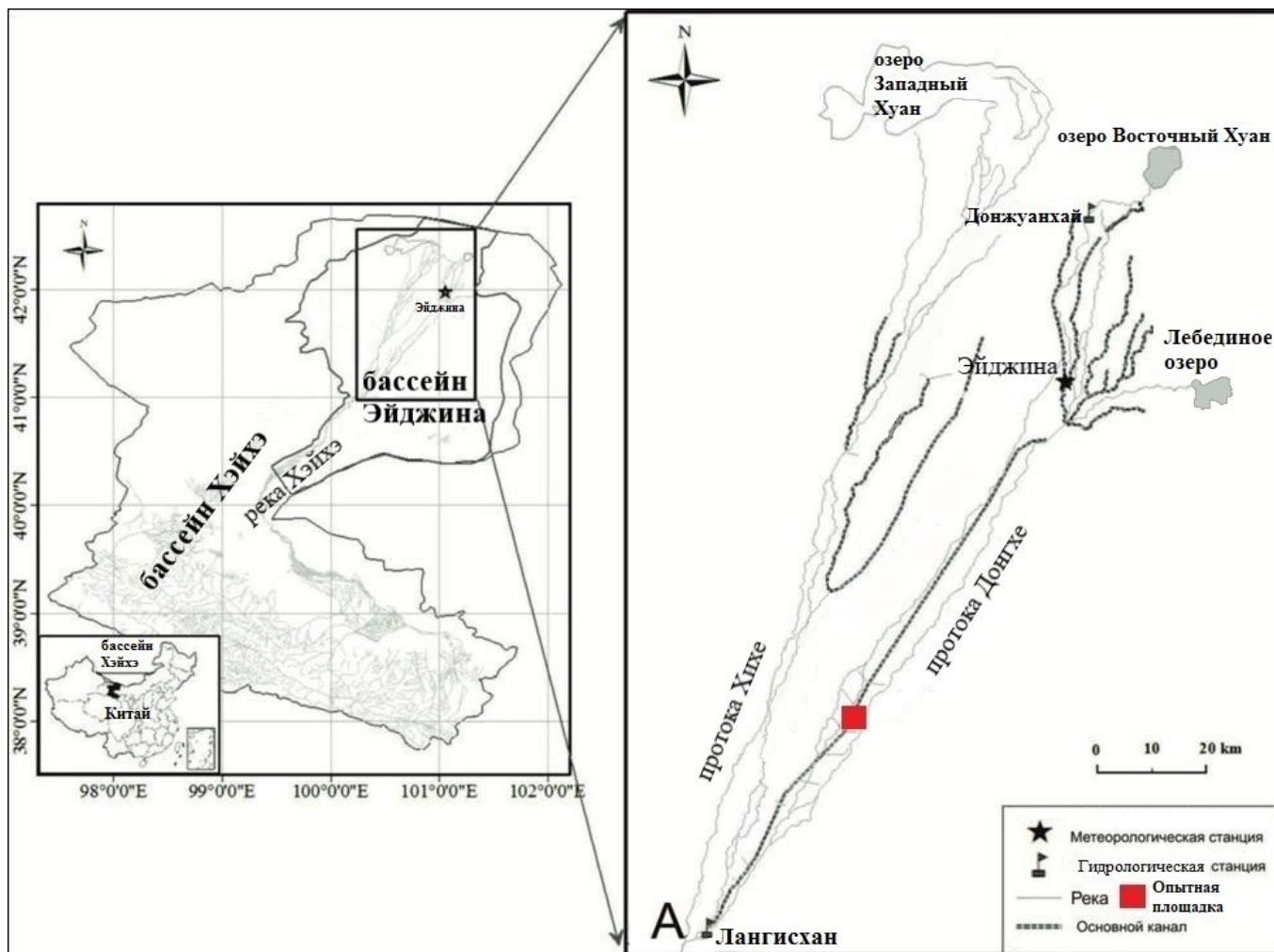


Рис. 1. Местоположение бассейна Эйджина [Даутова, 2013], модифицировано автором

Климат бассейна типичный аридный континентальный. Среднегодовая сумма осадков составляет 36 мм, средняя расчетная величина потенциального испарения - 1471 мм/год, среднегодовая температура воздуха равна 9 °C [Liu и др., 2016]. Выделяются два основных типа ландшафта: пустынный и оазисный. Зоны оазиса расположены вдоль протоков р. Хэйхэ и в ее дельте.

Русло реки широкое и мелкое, сложено песчаными и гравийными отложениями, обладающими относительно высокой проницаемостью [Wang и др., 2013]. В районе гидрологической станции Лангисхан река Хэйхэ разделяется на две протоки (западную – Хихе и восточную – Донгхе, рис. 1), которые впадают в систему бессточных озер. Обе протоки являются сезонными водотоками, их сток регулируется системой шлюзов, расположенной в Лангисхане.

Дополнительная антропогенная нагрузка на изучаемую систему выражается в отборе подземных вод для орошения преимущественно на юге и северо-востоке бассейна (рис. 4).

В структурном отношении бассейн Эйджина является западной частью Альшанского плато и представляет собой межгорный бассейн, который заполнен рыхлыми четвертичными отложениями на глубину несколько сотен метров. К этим отложениям приурочен единый водоносный комплекс, который в южной части является безнапорным и относительно однородным

по вертикали. В северной части бассейна в областях залегания относительно слабопроницаемых отложений он локально подразделяется на безнапорный и один или два межпластовых водоносных горизонта [Yang и др., 2011]. Река Хэйхэ является основным источником питания грунтовых вод (порядка 66% от общего питания [Wu и др., 2002]). Разгрузка грунтовых вод происходит путем эвапотранспирации и эксплуатации подземных вод.

Увеличение отбора воды из р. Хэйхэ для нужд орошения в районе среднего течения реки с середины прошлого века вызвало ряд геоэкологических проблем, таких как резкое снижение уровня грунтовых вод в низовье и вызванная им деградация растительности в оазисе Эйджина и прибрежных зонах [Xi и др., 2010, Даутова, 2013]. Обе протоки реки Хэйхэ стали сезонными водотоками с 1960-ых г., а бессточные озера полностью высохли к 1992 г. Для восстановления озер и растительности в оазисе в 2000 г. был реализован проект перевода стока р. Хэйхэ в нижнее течение, который предполагает запрет на полный разбор стока реки в среднем течении и поставку гарантированных объемов воды в нижнее течение. В результате реализации проекта уровень грунтовых вод в дельте р. Хэйхэ был восстановлен на локальной территории, а также в определенной степени была восстановлена растительность в оазисе [Wang и др., 2013].

Часть II. Оценка параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод в локальном масштабе

В третьей главе приводятся результаты экспериментальной оценки коэффициента фильтрации донных отложений методом налива в пьезометр, а также методика и результаты оценки взаимосвязи сезонно-пересыхающего водотока и подземных вод по данным наблюдений за температурным режимом подземных и поверхностных вод, донных отложений и уровнями подземных и поверхностных вод.

Наливы проводились в три полевых сезона в условиях различной мутности речной воды. В июне 2015 г. было проведено по три налива на опытной площадке в восточной протоке р. Хэйхэ возле температурных профилей T1 и T2 с использованием чистой речной воды. В сентябре 2016 г. на той же площадке было проведено 10 наливов с использованием мутной речной воды. В сентябре 2017 г. было проведено 22 налива в 16 точках на 5 площадках в русле западной и восточной протоков с использованием как специально привезенной чистой, так и мутной речной воды.

При проведении всех наливов использовались пластиковые трубы длиной 2 м и внутренним диаметром $d=4$ см, которые заглублялись в донные отложения на глубину $L=2-40$ см. Ход уровня регистрировался с помощью логгера модели Solinst Levelogger 3100 с точностью до 0.3 см с интервалом измерения 5 секунд.

Как следует из модели Хворстлева-Шестакова [Шестаков, 1995], выражение для текущего превышения уровня воды в пьезометре S над уровнем воды в реке имеет вид:

$$S = S_0 \exp(-Bt); B = kL^{-1} \left(1 + \frac{\pi d}{4La(L/d)} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где k – коэффициент фильтрации донных отложений, м/сут; $a(L/d)$ – параметр, изменяющийся от 3.7 до 2.8 в зависимости от глубины забивки пьезометра [Pozdniakov et al, 2016]; S_0 – превышение уровня воды в пьезометре над уровнем воды в реке на начальный момент времени, м.

Оказалось, что не все диагностические графики $\ln(S_0/S)$ от t имеют прямолинейный вид (серия наливов 2015 г.), как это следует из (1). В случае использования для налива мутной воды (серия наливов 2016 г.) фильтрационное сопротивление донных отложений растет во времени из-за осаждения взвешенных частиц, поэтому в данном случае график зависимости $\ln(S_0/S)$ от t становится нелинейным (оранжевые точки на рис. 2).

Для обработки наливов с изменяющимся во времени фильтрационным сопротивлением донных отложений предложена новая аналитическая модель [Vasilevsky et al, 2019], основанная на предпосылке о линейном росте фильтрационного сопротивления за счет осаждения взвешенных частиц, позволяющая выразить время от начала опыта t как функцию от текущего относительного превышения уровня в пьезометре S/S_0 :

$$t = \frac{(B\varepsilon S_0 + B + \delta) \left(\frac{S}{S_0} \right)^{-\frac{\delta}{B}} - (\varepsilon S_0 + 1)(B + \delta) + \varepsilon S_0 \delta \frac{S}{S_0}}{\delta(\delta + B)}, \quad (2)$$

где ε – параметр, отвечающий за осаждение частиц из фильтрующейся воды, м⁻¹; δ – параметр, отвечающий за осаждение частиц из воды в соответствии с законом Стокса, сут⁻¹.

При отсутствии осаждения взвешенных частиц выражение (2) переходит в уравнение (1).

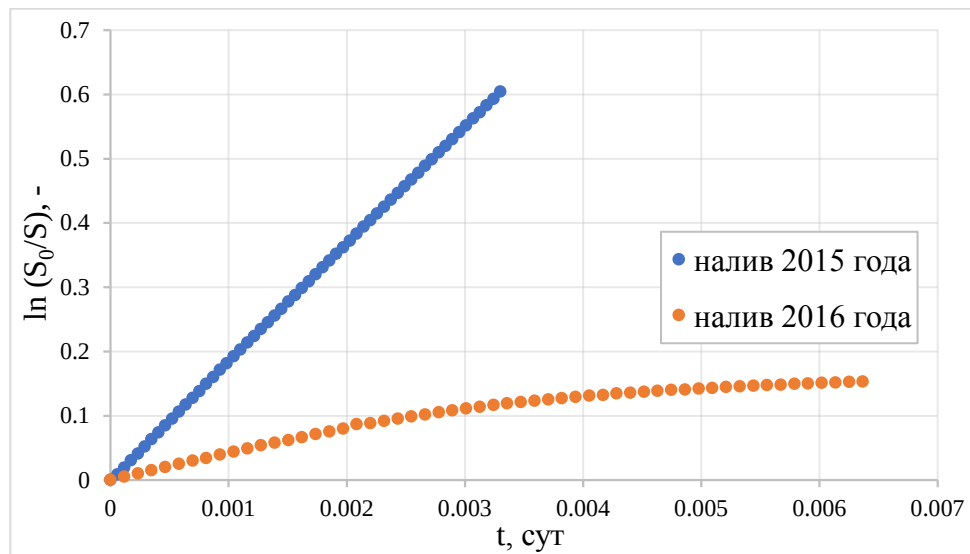


Рис. 2. Диагностические графики зависимостей $\ln(S_0/S)$ от t

Наливы 2015 г. обрабатывались по зависимостям (1) и (2). Методы показали близкие результаты, что подтвердило возможность использования модели линейного роста сопротивления

осадка для обработки результатов наливов, проведенных с использованием чистой воды. В районе профиля Т1 интервал изменения k составил 28-32 м/сут, в районе профиля Т2 - 39-42 м/сут.

Наливы 2016 и 2017 гг. обработаны без учета роста фильтрационного сопротивления и по модели его линейного роста (рис. 3). Модель линейного роста сопротивления осадка позволяет получить схожие значения k при проведении наливов как с мутной, так и с чистой водой в одной и той же точке опробования, что свидетельствует о том, что эта модель позволяет корректно учесть образование осадка на дне пьезометра в ходе налива. Полученный интервал изменения k по модели, учитывающей рост фильтрационного сопротивления, составил для наливов 2016 г. 0.3-22 м/сут, для наливов 2017 г. – 1-41 м/сут. В то же время модель Хворстлева-Шестакова, не учитывающая рост фильтрационного сопротивления во времени, дает заниженные значения k в опытах с мутной водой и близкие значения коэффициента фильтрации при использовании для наливов чистой воды.

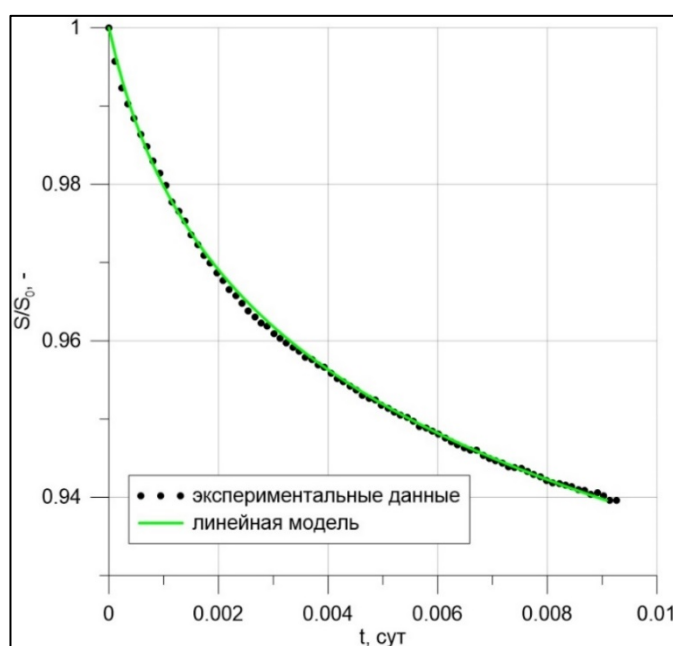


Рис. 3. Результаты обработки налива 2016 г. по модели линейного роста фильтрационного сопротивления

По результатам обработки 38 проведенных наливов k изменяется в пределах двух порядков – от 0.3 до 42 м/сут. В то же время, значения коэффициентов фильтрации, полученные в 2015 г. при низком уровне чистой воды в реке в среднем выше, чем значения, полученные в 2016-2017 гг. при высоком уровне мутной воды в реке на одной и той же площадке. Это объясняется наличием слабопроницаемого осадка, который формируется за счет осаждения частиц из мутной воды и смывается при следующем паводке. Таким образом, мутность воды является важным фактором, который влияет на пространственно-временную изменчивость фильтрационных свойств донных отложений.

Наблюдения за уровнями и температурами подземных и поверхностных вод, а также температурами профиля донных отложений проводились на опытной площадке, расположенной в восточной протоке р. Хэйхэ (рис. 1). На опытной площадке оборудована система мониторинга,

которая представляет собой пару скважин с температурными датчиками и датчиками давления, одна из которых расположена непосредственно в русле реки, а вторая - на берегу. Температуры и уровни регистрировались с помощью логгеров Solinst Levellogger 3001 с временным интервалом 30 минут. Также в систему мониторинга входят два профиля (Т1, Т2), фиксирующие температуру донных отложений на глубинах 5, 10, 20, 50, 80, 180 см. Температура измерялась с помощью датчиков PT100 с временным интервалом 1 час.

Для оценки фильтрационных потерь из русла р. Хэйхэ были созданы две модели тепловлагопереноса: по профилю Т1 и по профилю Т2. При моделировании принята схема одномерного вертикального теплообмена в донных отложениях. Расчет насыщенно-ненасыщенной фильтрации (3а) и теплопереноса (3б) производился с использованием математической модели [Simunek и др., 2013]:

$$\frac{\partial}{\partial z} k_w(T, z) \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} - C_w v \frac{\partial T}{\partial z} = C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3б)$$

где H - напор, м; θ - объемное влагосодержание, д.е.; T – температура, °С; λ – теплопроводность донных отложений, Вт/м/°С; C_w и C_p – объемная теплоемкость воды и донных отложений соответственно, Дж/ м³/°С; v – скорость фильтрации, м/сут; k_w – коэффициент влагопереноса, м/сут.

Граничные условия для фильтрации и переноса тепла были заданы по данным режимных наблюдений. Параметры влагопереноса в зоне аэрации задавались по результатам определения ОГХ методом центрифугирования [Дедюлина и др., 2020] с последующей аппроксимацией ОГХ уравнением ван Генухтена. Коэффициенты фильтрации верхних трех модельных слоев задавались по результатам опробования донных отложений с помощью наливов в пьезометры. При этом для модели профиля Т1 было принято минимальное среднее значение (1 м/сут), а для модели профиля Т2 – максимальное среднее значение (40 м/сут), что соответствует данным наблюдений (профиль Т1 является менее «конвективным», чем профиль Т2). Параметры теплопроводности донных отложений рассчитывались по набору параметров модели Чанга и Хортонa [Chung и др., 1987].

Объектом калибровки являлся коэффициент фильтрации четвертого модельного слоя, который подбирался по совпадению наблюдаемых и модельных температур по профилям Т1, Т2 и скважине П7-Р. Минимальные значения RSME (среднеквадратичное отклонение остатков) для моделей профилей Т1 и Т2 достигаются при $k=4$ м/сут.

Результаты расчетов показали, что средние расчетные фильтрационные потери на участке профиля Т2 (0.28 м/сут) оказались на 40% больше потерь на участке профиля Т1 (0.2 м/сут), что объясняется более высоким значением коэффициента фильтрации трех верхних модельных слоев модели профиля Т2, чем модели профиля Т1.

Для выявления влияния изменения температуры речной воды (сезонный диапазон составляет от 1 до 20 °С) на величину фильтрационных потерь, потери были оценены с помощью двух моделей (профилей Т1 и Т2) с температурой по всей глубине профилей равной среднегодовой температуре подземных вод по данным наблюдений (12 °С). Результаты расчетов продемонстрировали, что неучет зависимости коэффициента фильтрации от температуры воды ведет к завышению фильтрационных потерь модели профиля Т1 на 8% и модели профиля Т2 на 11%. Самая большая разница в потерях приходится на зимний период, когда температура воды близка к 0 °С, и коэффициент фильтрации донных отложений значительно уменьшается.

Для верификации полученных результатов использован метод анализа суточных колебаний температуры, который предполагает решение одномерного уравнения вертикального теплопереноса (3б) в донных отложениях при гармонических суточных колебаниях температуры в водотоке для краткосрочных периодов, когда скорость фильтрации из русла v постоянна во времени [Stallman, 1965].

Для расчета скорости фильтрации из русла реки были использованы данные наблюдений за температурами донных отложений на глубинах 5, 10, 20, 50, 80, 180 см за 2014-2015 гг. по профилям Т1 и Т2 с интервалом измерения 1 час. Для расчетов были выбраны два периода длительностью 7-8 суток, отвечающие условиям: наличие воды в русле реки; отсутствие резких колебаний уровня речных вод; наличие суточных колебаний температуры донных отложений с амплитудой, превышающей точность температурных датчиков. Расчеты скорости фильтрации производились с использованием решения уравнения (3б) для затухания амплитуд суточных колебаний температуры с глубиной [Hatch и др., 2006].

По результатам расчетов скорости нисходящей фильтрации из русла реки получено совпадение расчетной скорости фильтрации с данными моделирования тепловлагопереноса с погрешностью 10-20% при использовании пары датчиков, разнесенной по глубине на расстояние 30 см и более и расположении датчиков на глубине 50 см и более.

Используя средние расчетные значения скоростей фильтрации и разницы напоров между поверхностными и подземными водами, рассчитаны средние значения коэффициентов перетока донных отложений. Для модели профиля Т1 было получено значение $k_0/m_0=0.45 \text{ сут}^{-1}$, для модели профиля Т2 - 0.71 сут^{-1} .

Часть III. Оценка параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод в региональном масштабе

В четвертой главе приводятся результаты геогидрологического моделирования взаимосвязи поверхностных и подземных вод в долине протоки Донгхе (модель I), а также результаты моделирования водного баланса всего бассейна Эйджина (модель II).

Основными задачами создания модели I являлись оценка динамики фильтрационных потерь из протяженного участка русла (рис. 4) и выявление факторов, на нее влияющих.

Моделирование производилось в нестационарной постановке для периода с 21 апреля 2010 г. по 7 сентября 2012 г. Размеры двухмерной плановой модели - 112.5x20.5 км, размер блока равномерной ортогональной сетки - 500x500 м. В модели грунтовый водоносный комплекс задан единым расчетным слоем так как на этом участке в разрезе отсутствуют протяженные и выдержанные по мощности слабопроницаемые отложения.

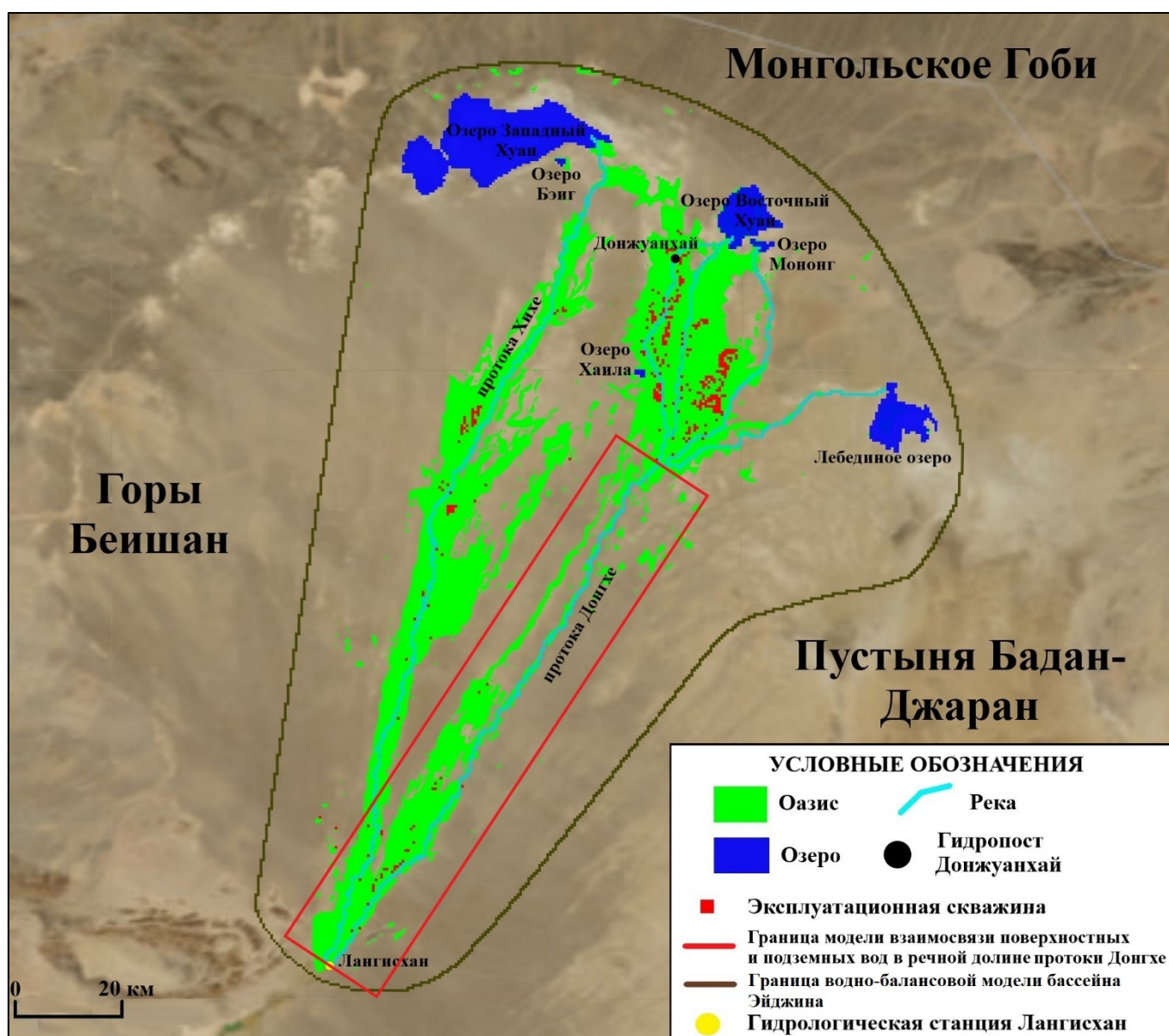


Рис. 4. Области моделирования модели взаимосвязи поверхностных и подземных вод в речной долине протоки Донгхе и региональной водно-балансовой модели бассейна Эйджина

Внешние границы модели в плане заданы по линиям тока и обоснованы шириной зоны влияния взаимодействия поверхностных и подземных вод, которая составляет приблизительно по 10 км к востоку и западу от протоки Донгхе [Wang и др., 2014]. Северная и южная границы модели заданы в качестве границ III рода и расположены в районе дельты р. Хэйхэ и гидрометрической станции Лангисхан. Во входящем сечении (станция Лангисхан) задан известный расход реки.

Для моделирования взаимодействия подземных и поверхностных вод использовался пакет STR [Prudic, 1989]. Эвапотранспирационная разгрузка моделировалась с помощью пакета EVT [Harbaugh, 2005]. В модель заданы две области (пустыни и оазиса) с различными параметрами эвапотранспирационной разгрузки (рис. 4).

Калибровка модели производилась по уровням подземных и поверхностных вод (девять точек). В ходе калибровки уточнялись значения геофильтрационных параметров, параметров проводимости русла (пакет STR) и проводимости удаленных границ (пакет GHB). Для оценки качества калибровки использовались RSME (0.04-0.31 м) и коэффициент корреляции (0.77-0.95). Разница между модельными и наблюдаемыми уровнями в основном не превысила 0.5 м.

Анализ баланса подземных вод демонстрирует, что основным источником питания являются фильтрационные потери из русла реки (84% общего пополнения), а основная разгрузка потока происходит эвапотранспирацией преимущественно в прибрежных зонах оазиса (59% общей разгрузки), что согласуется с литературными данными [Wang и др., 2014]. Разница между общим пополнением ($4.26 \cdot 10^8 \text{ м}^3$) и разгрузкой ($2.8 \cdot 10^8 \text{ м}^3$) подземных вод составила $1.46 \cdot 10^8 \text{ м}^3$, что отражает происходивший в моделируемый период средний подъем уровня по площади модели на 6 см и объясняется увеличением стока в результате реализации проекта по увеличению попусков воды в нижнее течение р. Хэйхэ.

В целом, за 871 сутки моделирования кумулятивный сток протоки Донгхе составил $9.19 \cdot 10^8 \text{ м}^3$, а доля потерь речного стока – 33% ($3.03 \cdot 10^8 \text{ м}^3$). Доля потерь речного стока изменялась в зависимости от объемов попуска воды в протоку в значительных пределах. Для попусков менее месяца она составила 42-99.8%, а для длительных попусков – 24-38%. Подобная разница объясняется уменьшением среднего градиента напора между поверхностными и подземными водами в течение длительных попусков. Таким образом, для транспортировки максимального объема воды к бессточным озерам, следует делать длительные попуски в зимнее время, а для поддержки прибрежных экосистем – короткие в летнее и весеннее время.

Расчет безразмерных коэффициентов чувствительности модельных фильтрационных потерь к геофильтрационным параметрам показал, что максимальная чувствительность выявлена к коэффициенту фильтрации пласта (0.57) и величине потенциальной эвапотранспирации (0.28). Меньшая чувствительность наблюдается к гравитационной водоотдаче пласта (0.08) и проводимости русла реки (0.02).

Для генерализации и объяснения полученных результатов анализа чувствительности исследована упрощенная модель взаимосвязи потока подземных вод с экранированным водотоком в подпертом режиме фильтрации с учетом эвапотранспирации со свободной поверхности потока в речной долине. Рассмотрен одномерный стационарный поток подземных вод с удельным расходом q , сформированным на водоразделе (зона 3, рис. 5). Далее в зоне 2 (речная долина шириной $L_0/2$)

этот поток частично расходуется на эвапотранспирацию и поступает в зону 1 (шириной $L_r/2$) под экранированным водотоком с коэффициентом перетока k_0/m_0 . Зависимость интенсивности эвапотранспирации от глубины залегания уровня подземных вод принимается линейной, изменяющейся от ET_{max} при нулевой глубине залегания уровня до нуля при глубине залегания d_{max} .

Используя предпосылку Дюпюи о постоянстве напоров по вертикали и принимая проводимость горизонта T постоянной ($T=k \cdot H(x) \approx \text{const}$), можно записать систему одномерных уравнений для стационарного распределения напора подземных вод в зонах 1 и 2:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 H_1}{dx^2} - b_r^2 (H_1 - H_r) &= 0 \\ \frac{d^2 H_2}{dx^2} - b_{ET}^2 (H_2 - Z_{crit}) &= 0 \\ b_r &= \sqrt{\frac{k_0}{m_0 T}}; \quad b_{ET} = \sqrt{\frac{ET_{max}}{d_{max} T}}; \quad d_{max} = Z_{surf} - Z_{crit} \end{aligned} \quad (4)$$

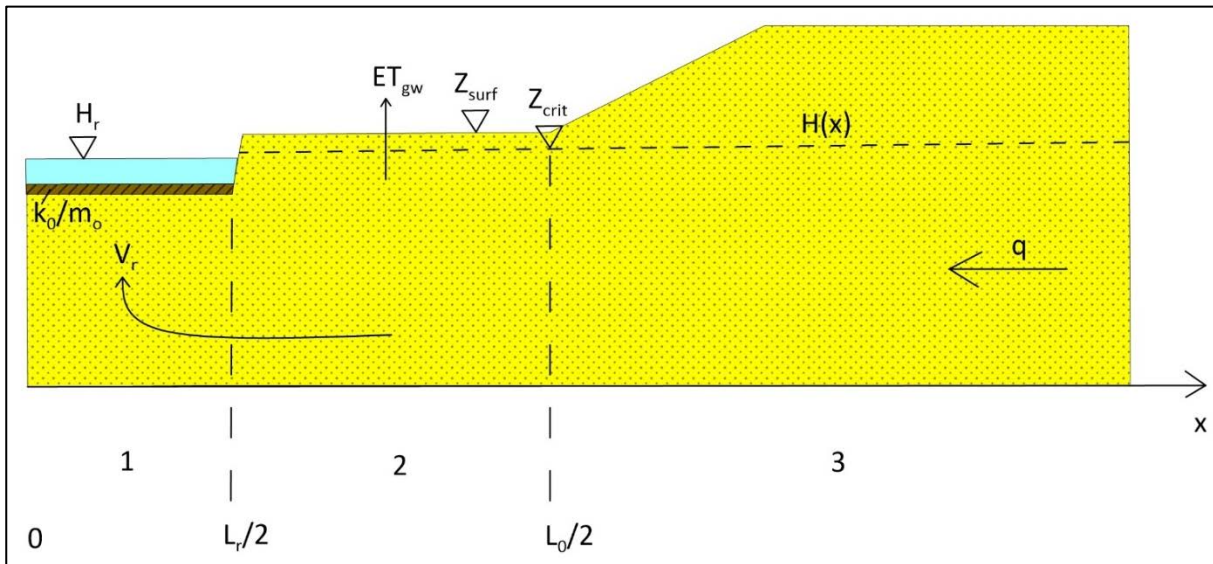


Рис. 5. Схема потока грунтовых вод в речной долине. Цифрами обозначены номера зон

Выражение для удельного расхода q_r , поступающего в реку, минуя зону эвапотранспирационной разгрузки, для рассматриваемой модели имеет вид:

$$q_r = qe^{b_{ET}L_0} + \frac{(\text{th}(0.5L_r b_r)(Z_{crit} b_r - H_r b_r + \frac{q e^{b_{ET}L_0} b_r}{T b_{ET}}) + \frac{q e^{b_{ET}L_0}}{T}) T b_{ET} (e^{2b_{ET}L_0} - 1)}{-b_r \text{th}(0.5L_r b_r)(e^{2b_{ET}L_0} + 1) - b_{ET} (e^{2b_{ET}L_0} - 1)} \quad (5)$$

В частном случае при нулевом расходе водораздельного потока ($q=0$) фильтрационные потери из реки питают грунтовый водоносный горизонт, а разгрузка подземных вод осуществляется посредством эвапотранспирации в речной долине. Данная схема описывает рассмотренную выше модель I. Удельный расход фильтрационных потерь из реки выражается:

$$q = T \frac{H_r - Z_{crit}}{L_{ET} (1 + \alpha_r)}; \quad L_{ET} = b_{ET}^{-1} \text{cth}(0.5L_0 b_{ET}); \quad \alpha_r = \frac{\Delta L}{L_{ET}} = \sqrt{\frac{ET_{max} m_0}{d_{max} k_0}} \text{cth}(0.5L_r b_r) \text{th}(0.5L_0 b_{ET}) \quad (6)$$

Таким образом, фильтрационный поток, направленный из русла реки в долину, где он разгружается за счет эвапотранспирации, зависит от двух параметров, которые имеют размерность длины. Первый, ΔL - эквивалентная длина несовершенства реки. Второй, L_{ET} - эквивалентная длина зоны эвапотранспирационной разгрузки, характеризует условное “сопротивление” разгрузке подземных вод эвапотранспирацией. Соотношение этих двух параметров характеризует критерий α_r .

Из зависимости (6) следует, что для малых значений критерия α_r ($\alpha_r < 0.1$) фильтрационное сопротивление донных отложений не оказывает значительного влияния на фильтрационные потери воды из реки. Для больших значений критерия α_r ($\alpha_r > 10$), потери из русла реки определяются фильтрационным сопротивлением донных отложений.

При характерных значениях параметров речной долины протоки Донгхе ET_{max} ($4 \cdot 10^{-3}$ м/сут), k_0/m_0 (0.6 сут $^{-1}$), T (3000 м 2 /сут), d_{max} (5 м) и L_r (100 м) величина параметра $\Delta L = 120$ м, а $L_{ET} = 1936$ м, соответственно, значение критерия α_r составляет всего 0.06 , что объясняет низкую чувствительность фильтрационных потерь к параметрам донных отложений в исследуемых условиях. Однако при уменьшении коэффициента перетока до 0.03 сут $^{-1}$, $\alpha_r = 1$, и параметры донных отложений начинают значительно влиять на фильтрационные потери из реки.

В модель II (рис. 4) для анализа общего водного баланса бассейна кроме процессов водообмена в системе “водотоки - подземные воды - эвапотранспирационная разгрузка - водоотбор подземных вод” включена система бессточных озер, в которые поступает вода как из водотоков, так и из подземных вод, а затем эта вода испаряется. Такой подход позволяет рассмотреть полный водный баланс бассейна, зная гидрограф стока р. Хэйхэ во входном створе – станции Лангисхан.

Моделирование водного баланса производилось в нестационарной постановке для периода с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2017 г. Моделируемое пространство размером 140×180 км аппроксимировано регулярной ортогональной сеткой с размером блока 500×500 м. В модели II грунтовый водоносный комплекс разбивался на три слоя с различными значениями параметров, что отражает вертикальную фильтрационную неоднородность водовмещающих отложений.

Внешние границы модели заданы по контуру границ бассейна (граничное условие III рода, пакет GHB [Harbaugh, 2005]). В районе гидрологической станции Лангисхан задан известный входящий расход реки за период времени 2000-2017 гг. для проток Хихе и Донгхе. Эвапотранспирационная разгрузка моделировалась с помощью пакета ETS1 [Banta, 2000], который позволяет учесть нелинейную зависимость величины испарения от глубины свободной поверхности. В области моделирования выделены две зоны с различными параметрами эвапотранспирации – пустыни и оазиса (рис. 4).

Для моделирования взаимодействия подземных и поверхностных вод использован пакет SFR2 [Niswonger и др., 2005]. Озера моделировались с помощью пакета LAK3 [Merritt и др., 2000],

учитывающего изменение площади акватории и глубины водоема в зависимости от объема воды в нем. Испарение с открытой водной поверхности и выпадение осадков на нее задано с помощью пакетов LAK3 и SFR2.

Калибровка модели производилась по комплексу наблюдений за уровнями подземных вод в 62 скважинах, расходами реки на гидрометрическом посту Донжуанхай, динамикой изменения площади бессточных озер и величины испарения с поверхности земли. Объектами калибровки являлись значения коэффициентов фильтрации и гравитационных емкостей грунтового водоносного комплекса, k_0/m_0 донных речных и озерных отложений, параметры проводимости удаленных границ ГНВ, а также доли стока на границах сегментов при разделении реки на протоки. Для оценки качества калибровки модели по наблюдаемым уровням использовались RSME (0.21-1.27 м) и коэффициент корреляции (0.6-0.94).

Основными критериями для калибровки коэффициента перетока донных речных и озерных отложений являлся наблюдаемый расход реки за период времени 2000-2017 гг. на гидрометрическом посту Донжуанхай на восточной протоке (рис. 4), а также данные изменения площадей озер Западный Хуан, Восточный Хуан и Лебединое, полученные с помощью анализа космоснимков Landsat-5, Landsat-7, и Landsat-8 с разрешением изображения 30 м [Li и др., 2019]. По состоянию на 31.12.2017 наблюдаемый кумулятивный объем стока за 18-летний период времени на гидрометрическом посту Донжуанхай составил $8.27 \cdot 10^8 \text{ м}^3$, а модельный - $8.35 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ (рис. 6). Модельная динамика изменения площади озера Восточный Хуан соответствует наблюдаемой (рис. 7). Аналогичный результат получен для озер Западный Хуан и Лебединое.

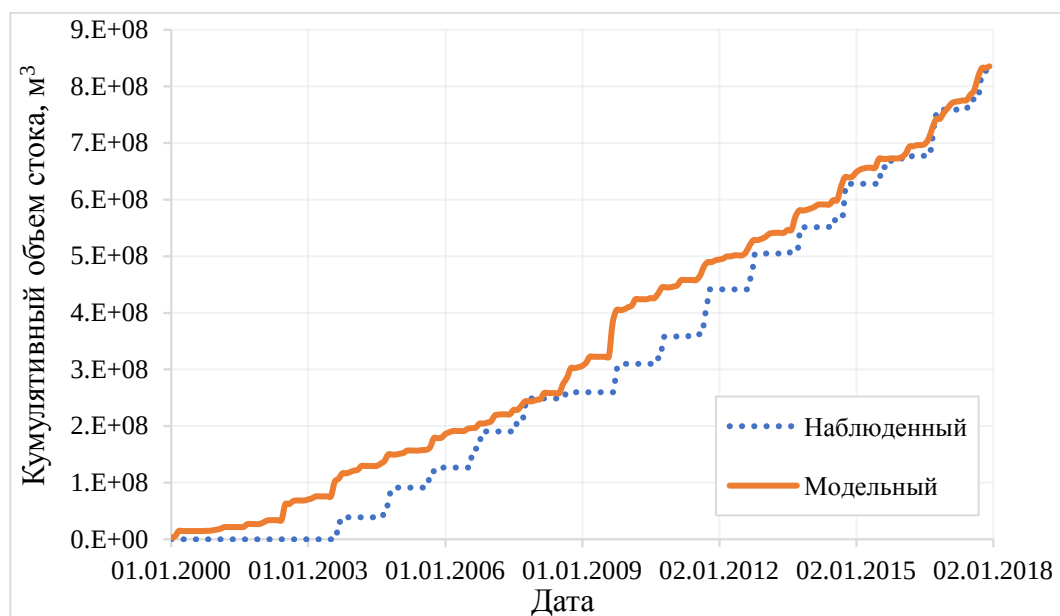


Рис. 6. Модельный и наблюдаемый кумулятивный объем стока на посту Донжуанхай за 2000-2017 гг.

В условиях гипераридного климата рассчитанные по данным дистанционных наблюдений величины испарения с поверхности земли могут с незначительной (равной величине атмосферных осадков) погрешностью рассматриваться, как характеристика эвапотранспирационной разгрузки

подземных вод. По данным MOD16 [Му и др., 2013] рассчитаны величины испарения с поверхности земли с разрешением в 0.5 км. В качестве исходных данных использованы ежедневные метеорологические данные и восьмидневные данные динамики растительности, полученные с помощью дистанционного зондирования по методике MODIS [Му и др., 2013]).

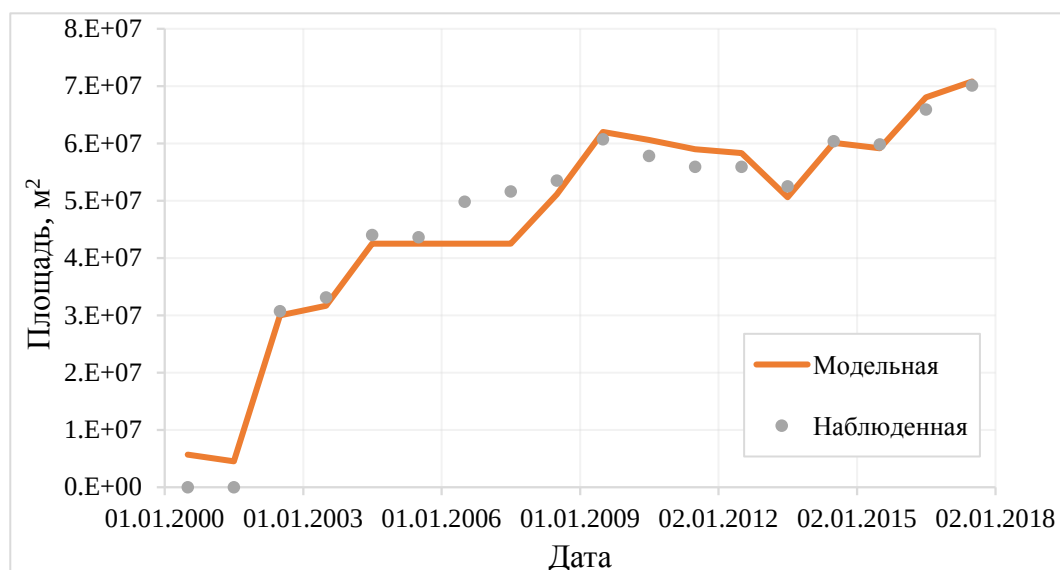


Рис. 7. Модельная и наблюдаемая динамика изменения площади озера Восточный Хуан за 2000-2017 гг.

Для сравнения модельной и наблюдаемой эвапотранспирационных разгрузок в пределах оазиса были выбраны два участка, занятые растительностью общей площадью 79 км². За июль 2017 г. модельная и наблюдаемая эвапотранспирационные разгрузки различаются всего на 5%, а за весь 2017 г. – на 22%. Разница между годовой модельной (117 мм/год) и наблюдаемой (150 мм/год) эвапотранспирационными разгрузками составляет 33 мм, что практически точно совпадает с годовой суммой осадков по данным метеостанции Эйджина (30 мм за 2017 г.).

Анализ компонентов баланса подземных вод демонстрирует, что основным источником питания подземных вод являются фильтрационные потери из русла реки (75% общего пополнения), а основная часть разгрузки - эвапотранспирация подземных вод (62% общей разгрузки), что согласуется с литературными данными [Wang и др., 2014] и результатом, полученным на модели I. Разница между общей разгрузкой ($1.28 \cdot 10^{10}$ м³) и питанием ($8.68 \cdot 10^9$ м³) составила $4.08 \cdot 10^9$ м³, т.е. в целом в бассейне Эйджина еще продолжается региональный спад уровня, хотя в прибрежных зонах и оазисе уровень растет со скоростью несколько сантиметров в год.

По результатам моделирования суточные величины фильтрационных потерь оказались в значительной степени зависимы от величины входящего расхода реки. Общий кумулятивный объем стока проток Донгхе и Хихе составил $1.04 \cdot 10^{10}$ м³, а объем потерь речного стока – $6.32 \cdot 10^9$ м³ (61% общего стока).

На модели II решалась прогнозная задача по оценке расхода пропуска воды в нижнее течение р. Хэйхэ для стабилизации площадей бессточных озер. В результате оказалось, что в нижнее

течение р. Хэйхэ необходимо пропускать $7.7 \cdot 10^8$ м³/год, что на 34% больше среднего расхода за предыдущие 18 лет (2000-2017 гг.). Из указанного выше расхода порядка 41% дойдет до бессточных озер, а 59% сформирует фильтрационные потери, расходуемые в основном на эвапотранспирацию в прибрежной зоне. При этом необходимо распределять порядка 27% стока в протоку Хихе и 73% стока – в протоку Донгхе. Для озера Западный Хуан среднемноголетняя стабильная площадь составит $6.7 \cdot 10^7$ м² (по состоянию на 2021 г. вода в озере отсутствует), для озера Восточный Хуан - $7.3 \cdot 10^7$ м² (на 30% больше площади озера по состоянию на 2021 г.), для Лебединого озера - $6.4 \cdot 10^7$ м² (на 50% больше площади озера по состоянию на 2021 г.).

Полученный на откалиброванной модели II оптимальный расход реки Хэйхэ в нижнем течении ($7.7 \cdot 10^8$ м³/год) хорошо совпадает с результатами предшествующих прогнозных оценок: [Wu и др., 2003] - оптимальный расход $7.5 \cdot 10^8$ м³/год, [Xi и др., 2010] - $9 \cdot 10^8$ м³/год.

В пятой главе проведен сопоставительный анализ результатов исследований разных масштабов. В результате анализа тепловлагопереноса на участке детальных исследований средняя скорость фильтрационных потерь из русла реки в годовом цикле моделирования составила 0.2-0.28 м/сут. По результатам расчетов при помощи модели I средняя скорость фильтрационных потерь из участка русла длиной 133 км за 871 сутки моделирования составила $3.03 \cdot 10^{-2}$ м/сут, при помощи модели II из участка русла длиной 635 км в 18-летнем цикле моделирования – $2.91 \cdot 10^{-2}$ м/сут, относительная разница составила 4%. Таким образом, средняя скорость фильтрационных потерь из протяженных участков русел, полученная с помощью региональных моделей, оказалась примерно на порядок ниже, чем скорость фильтрационных потерь, оцененная в локальном масштабе.

В результате калибровки модели II значение коэффициента перетока составило в среднем 0.0037 сут⁻¹, что на 2 порядка ниже, чем было получено в результате опробования на ключевом участке (0.6 сут⁻¹). Для объяснения этого несоответствия построена вспомогательная трехмерная модель фильтрации подземных вод у водотока, несовершенного по степени вскрытия водоносного пласта с характерной для протоки Донгхе геометрией. Сравнение этой модели с эквивалентной моделью планового потока показало, что в модели планового потока требуется задание расчетного эффективного параметра k_0/m_0 донных отложений существенно меньшего, чем величина этого параметра, определяемая по данным опробования. Этот эффективный параметр включает в себя общее фильтрационное сопротивление за счет несовершенства водотока как по степени, так по характеру вскрытия пласта [Шестаков, 1993]. Таким образом, в условиях бассейна Эйджина (мощность водовмещающей толщи существенно превышает ширину реки, а водовмещающие отложения обладают вертикальной анизотропией), несовершенство р. Хэйхэ по степени вскрытия играет значительную роль в общем расчетном фильтрационном сопротивлении донных отложений, что объясняет различные значения коэффициента перетока, полученные на локальном и региональном уровнях.

Заключение

1. Оценка фильтрационных свойств донных отложений методом налива в забивные пьезометры продемонстрировала значительную фильтрационную неоднородность верхнего 40-сантиметрового интервала донных отложений нижнего течения р. Хэйхэ. Интервал изменения коэффициента фильтрации на ключевом участке по данным 38 проведенных полевых опробований составил от 0.3 до 42 м/сут.
2. В процессе проведения полевого опробования донных отложений при помощи наливов в забивные пьезометры выявлен эффект осаждения взвешенных частиц из фильтрующейся из пьезометра мутной воды. При обработке результатов наливов в донные отложения следует строить диагностические графики в координатах $\ln (S_0/S)$ от t для выбора модели дальнейшей обработки: Хворстлева-Шестакова, не учитывающей рост фильтрационного сопротивления осадка на дне пьезометра во времени или разработанной и опробованной автором при обработке данных полевых исследований модели линейного роста фильтрационного сопротивления. При отсутствии в полевых условиях чистой воды для проведения наливов следует предварительно фильтровать речную воду, чтобы избежать осаждения взвешенных частиц, что значительно упрощает интерпретацию результатов опыта.
3. Оценка параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод в локальном масштабе произведена с помощью двух методов: моделирование сезонной и суточной динамики тепловлагодонпереноса. Для параметризации и калибровки моделей использованы данные мониторинга за уровнями и температурами подземных и поверхностных вод, температурами вертикального профиля донных отложений, а также данные фильтрационного опробования донных отложений. Используемые методы продемонстрировали хорошую сходимость результатов. На участке детальных исследований в нижнем течении р. Хэйхэ разница результатов моделирования в суточном и сезонном масштабах составила 10-20%. Среднегодовая скорость нисходящей фильтрации из русла реки, рассчитанная по результатам моделирования сезонной динамики тепловлагодонпереноса, составила 0.2-0.28 м/сут, интервал среднего значения параметра k_0/m_0 - 0.45-0.71 сут⁻¹.
4. Важными факторами, влияющими на временную изменчивость фильтрационных потерь водотоков в условиях аридного климата, являются мутность и температура поверхностных вод. Неучет зависимости коэффициента фильтрации донных отложений от температуры ведет к завышению расчетных фильтрационных потерь из русла реки на величину порядка 10% в среднегодовом разрезе и существенно увеличивает расчетные зимние фильтрационные потери из русла.
5. При построении региональных геогидрологических моделей территорий с аридным климатом, следует учитывать эвапотранспирационные процессы в прибрежных зонах, которые играют

важную роль в формировании фильтрационных потерь из русла реки и в балансе подземных вод. Результаты геогидрологического моделирования двух протяженных участков русел (длиной 133 км и 635 км) в нижнем течении р. Хэйхэ показали, что средняя доля фильтрационных потерь составила от 33% до 61% от общего входящего стока реки, в зависимости от рассматриваемого участка русла и периода моделирования. Результаты моделирования продемонстрировали связь фильтрационных потерь из русла реки со входящим поверхностным стоком и позволили сформировать рекомендации по регулированию стока нижнего течения р. Хэйхэ.

6. Для оценки чувствительности фильтрационных потерь из русла реки к параметрам модели разработано аналитическое решение задачи фильтрации подземных вод в речной долине при их несовершенной связи с водотоком с учетом испарения со свободной поверхности. Введен безразмерный критерий α_r , по значению которого определяется степень влияния параметров донных отложений на фильтрационные потери речной воды. По результатам калибровки региональной модели бассейна Эйджина расчетное значение критерия α_r в среднем составляет более 6, что указывает на существенное влияние несовершенства гидравлической связи русел водотоков с подземными водами на величину фильтрационных потерь.
7. Калибровка региональной водно-балансовой модели бассейна Эйджина произведена с использованием данных комплексного мониторинга за уровнями и расходами подземных и поверхностных вод и данных дистанционных наблюдений за динамикой изменения площадей бессточных озер и эвапотранспирацией с поверхности земли. Хорошее соответствие модельных и наблюдаемых величин позволило подтвердить соответствие модели природным условиям и обосновать ее использование в качестве инструмента для прогнозного обоснования мероприятий по улучшению водно-балансовой обстановки рассматриваемой территории.
8. Для поддержания водного баланса прибрежной экосистемы в нижнем течении р. Хэйхэ, целесообразно делать короткие пуски в весенне-летний период времени, а для пропуска максимального объема воды в бессточные озера – длинные пуски (продолжительностью месяц и более) в зимнее время. Для стабилизации площадей трех основных бессточных озер (Восточный Хуан, Западный Хуан и Лебединое) и поддержания устойчивого экологического состояния оазиса Эйджина в нижнее течение р. Хэйхэ следует ежегодно пропускать порядка $7.7 \cdot 10^8$ м³ воды. При этом необходимо распределять порядка 27% стока в западную протоку и 73% стока – в восточную протоку р. Хэйхэ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

1. Wang P., Pozdniakov S.P., **Vasilevskiy P.Y.** Estimating groundwater-ephemeral stream exchange in hyper-arid environments: Field experiments and numerical simulations // Journal of Hydrology. 2017. Т. 555. С. 68–79. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.10.004. Импакт-фактор журнала по версии Scopus 2019: 1.684.
2. **Vasilevskiy P.Y.**, Wang P., Pozdniakov S.P., Davis P. Revisiting the modified Hvorslev formula to account for the dynamic process of streambed clogging: Field validation // Journal of Hydrology. 2019. №568. С. 862–866. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.11.034. Импакт-фактор журнала по версии Scopus 2019: 1.684.
3. **Василевский П.Ю.**, Ван П. Оценка скорости фильтрации из русла реки по данным суточных колебаний температуры донных отложений на примере р. Хэйхэ (Внутренняя Монголия, Китай) // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 6. С. 81-86. Импакт-фактор журнала в РИНЦ 2019: 0.400.
4. Min L., **Vasilevskiy P.Y.**, Wang P., Pozdniakov S.P., Yu J. Numerical approaches for estimating daily river leakage from arid ephemeral streams // Water (Switzerland). 2020. Т.12, №2. doi: 10.3390/w12020499. Импакт-фактор журнала по версии Scopus 2019: 0.657.
5. Дедюлина Е.А., **Василевский П.Ю.**, Поздняков С.П. Чувствительность расчетов инфильтрационного питания к параметру связности пор зоны аэрации // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 1. С. 81-87. Импакт-фактор журнала в РИНЦ 2019: 0.400.

Статьи и тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

6. **Василевский П.Ю.** Оценка взаимосвязи поверхностных и подземных вод с помощью моделирования тепловлагоденоса [Электронный ресурс] // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2016». Секция «Геология». – М.: МАКС Пресс, 2016. Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2016/index.htm (13.01.2021).
7. **Василевский П.Ю.** Оценка взаимосвязи поверхностных и подземных вод по данным термометрии и фильтрационного опробования донных отложений [Электронный ресурс] // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017». Секция «Геология». – М.: МАКС Пресс, 2017. Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2017/index.htm (13.01.2021).
8. **Василевский П.Ю.** Оценка фильтрационных потерь из русла реки в условиях аридного климата с помощью региональной геогидрологической модели [Электронный ресурс] // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019». Секция «Геология». – М.: МАКС Пресс, 2019. Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2019/index.htm (13.01.2021).
9. **Василевский П.Ю.** Оценка взаимосвязи поверхностных и подземных вод в условиях аридного климата с помощью региональной геогидрологической модели [Электронный ресурс] // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020». Секция «Геология». – М.: МАКС Пресс, 2020. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/index.htm (13.01.2021).