

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Ян Хэн

Ян Хэн

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ И БОЛОТНЫХ
ВОД В ГУМИДНЫХ УСЛОВИЯХ УМЕРЕННОГО И
СУБТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТОВ
(на примере объектов Западной Сибири России и
Восточного Китая)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.6 – Гидрогеология

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Савичев Олег Геннадьевич

доктор географических наук, профессор,
профессор отделения геологии, Инженерная
школа природных ресурсов, Томский
политехнический университет

Официальные оппоненты:

Борзенко Светлана Владимировна

доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН
Институт природных ресурсов, экологии и
криологии Сибирского отделения Российской
академии наук, главный научный сотрудник

Плюснин Алексей Максимович

доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН
Геологический институт имени Н.Л. Добрецова
Сибирского отделения Российской академии наук,
заведующий лабораторией гидрогеологии и
геоэкологии

Защита состоится «21» октября 2023 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.25 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 (корпус 20, ауд. 504).



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « ____ » июня 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.25,
доктор геолого-минералогических наук

A stylized handwritten signature in blue ink, belonging to Olesya Evgenyevna Lepokurova.

Лепокурова
Олеся Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Формирование ресурсов и химического состава подземных вод верхней гидродинамической зоны в ряде регионов мира с гумидным климатом и равнинным рельефом в значительной мере связано с процессами возникновения, эволюции и деградации болот, причем это влияние является взаимным [Иванов, 1975; Шварцев, 1998; Подземные воды мира..., 2007]. Наиболее характерный пример такого влияния – современные и палеогидрогеологические условия Западно-Сибирской равнины (Российская Федерация), значительная часть которой покрыта болотами. Болотные воды содержат большое количество органических веществ и продуктов их трансформации, что существенно осложняет обеспечение населения качественной питьевой водой. Эта территория также отличается значительным накоплением осадочных железных руд и ряда других полезных ископаемых, происхождение которых является предметом дискуссии многих ученых, но в основном при признании важной роли подземных вод и понимании их взаимосвязи с процессами функционирования болотных экосистем [Шварцев, 1998; Геологическая эволюция..., т.2, 2007]. Большое значение имеет проработка и других вопросов хозяйственного освоения территории в сложных гидрогеологических условиях.

С учетом этого в Томском политехническом университете (ТПУ) под руководством профессоров П.А. Удодова и С.Л. Шварцева с 1960-х гг. проводятся исследования в указанном направлении [Рассказов и др., 1971; Научные предпосылки..., 1977; Геологическая эволюция..., т.2, 2007; Schvartsev et al., 2014 и др.]. Однако многие вопросы взаимодействия подземных и болотных вод до сих пор решены не в полной мере. Так, все это время не прекращается обсуждение возможности водной миграции соединений железа и других химических элементов в мезо-кайнозойских отложениях в пределах верхней части (до 150–200 м) геологического разреза (включая массообмен между торфяной залежью и водоносными горизонтами), роли подземных вод в формировании болот разных типов, методологии и технологий разработки железорудных месторождений и так далее [Рассказов и др., 1971; Ермашова, 1998; Здвижков, 2005; Шайхиев, Рихванов, 2015; Mezhibor, Arbuzov, Arkhipov, 2013; Веретенникова и др., 2021 и др.].

Аналогичные проблемы существуют и в других регионах мира, в том числе – в водосборе одного из крупнейших в Китае пресноводных озер – озера Поян – элемента водной системы реки Янцзы (основная часть водосбора озера расположена в пределах провинции Цзянси), причем особенностью этой территории являются значительные колебания уровней воды. В результате этого в условиях равнинного рельефа значительные площади то покрываются водой, то осушаются. Как следствие, здесь распространены болота и заболоченные земли, которые вместе с лагунами, поймами и зарастающими озерами многие авторы объединяют в рамках понятия о водно-болотных угодьях или ветландах – переувлажненных территориях, подверженных

подтоплению и затоплению. При колебаниях уровней озерных вод в годы и сезоны года с разной водностью возникают условия, с одной стороны, их поступления в ветланды, а затем в подземные водоносные горизонты, а с другой стороны – разгрузки подземных вод в ветланды и озеро Поян, что должно сказываться на качестве подземных вод, прежде всего – грунтовых.

Всё это и определяет актуальность исследований взаимодействий подземных и болотных вод в условиях гумидного климата и равнинного рельефа, в том числе на юго-востоке Западной Сибири в Российской Федерации (юг Томской области, РФ) и в Китайской народной республике (провинция Цзянси, КНР). При этом мы полагаем, что, во-первых, рассмотрение этой проблемы в разных природных условиях и на территориях с разной степенью антропогенной нагрузки позволяет избежать переоценки локальных факторов и, следовательно, более достоверно выявить закономерности и особенности таких взаимодействий. Во-вторых, целесообразно сопоставить подземные и болотные воды в России и Китае с учетом разной степени сходства факторов и обстановок. Предварительный анализ и последующие исследования показали, что гидрогеологические условия на заболоченных территориях водосбора озера Поян – элемента гидрографической сети реки Янцзы – наиболее сопоставимы с низинными болотами в Западной Сибири. С учетом этого в последнем случае было выбрано низинное Обское болото, расположенное в долине р. Обь. В-третьих, по возможности нужно рассматривать и гидрогеохимические, и гидрогеодинамические аспекты взаимодействий подземных и болотных вод.

С учетом этого автором проведено исследование, **цель** которого – выявление закономерностей и особенностей формирования химического состава подземных и болотных вод на примере болот и заболоченных земель на юго-востоке Западной Сибири в Российской Федерации (юг Томской области) и в водосборе озера Поян в Китайской народной республике (провинция Цзянси).

Для достижения этой цели были рассмотрены следующие **задачи** исследования: 1) количественная оценка элементов водного баланса и гидрогеодинамических условий взаимодействий подземных и болотных вод низинного Обского болота; 2) выявление взаимосвязей между химическим составом подземных вод верхней гидродинамической зоны и болотных вод на юго-востоке Западной Сибири (Томская область, РФ) и в водосборе озера Поян (провинция Цзянси, КНР); 3) оценка влияния загрязнения болот на состояние связанных с ними подземных вод на примере низинного Обского болота (Томская область, РФ) и водно-болотных угодий в водосборе озера Поян (провинция Цзянси, КНР).

Объект и методы исследования. Объектом исследования являются подземные воды, болота на юго-востоке Западной Сибири (Обское болото, а также Баксинское, Тимирязевское, Васюганское, РФ) и водно-болотные угодья (ветланды) в водосборе озера Поян (провинция Цзянси, КНР).

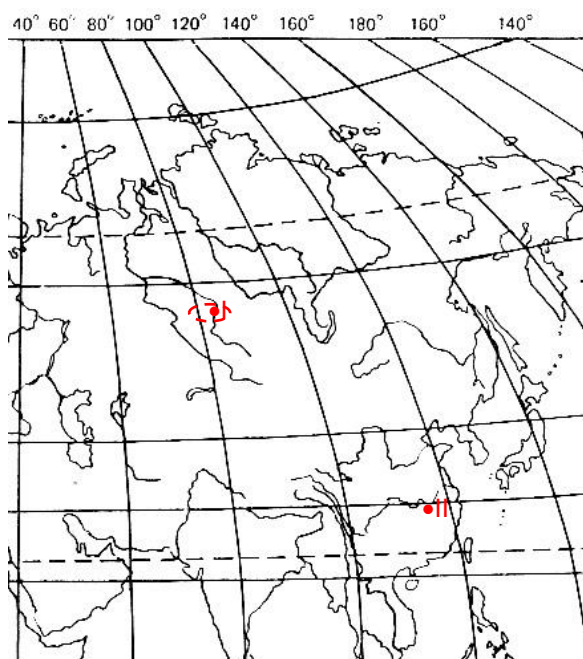


Рисунок 1 – Схема расположения объектов исследования в районе Обского (I) и ряда других болот в Сибири (пунктир), водно-болотных угодий в водосборе озера Поян (II)

В процессе исследования использовались методы: ландшафтно-геохимический, географо-гидрологический, статистический, методы математического моделирования, методы химического анализа вод, торфов и донных отложений (масс-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой, атомно-абсорбционный и другие).

В соответствии с поставленными задачами исследование включало в себя следующие этапы: 1) составление уравнения водного баланса водосбора Обского болота и анализ взаимосвязей между элементами водного баланса (оценка инфильтрации, расчёт по уравнению Дюпюи коэффициента фильтрации и сопоставление его со средневзвешенными измеренными значениями для определения глубины взаимодействия поверхностных и подземных вод); 2) анализ взаимосвязей между уровнями подземных и болотных вод (оценка зоны влияния болотных вод на подземные воды); 3) анализ взаимосвязей между химическим составом подземных и болотных вод (оценка возможности миграционных потоков в системе «болото – подземный водоносный горизонт» в различных природных условиях); 4) анализ влияния загрязнения болот на состояние связанных с ними подземных вод (оценка антропогенного влияния на состояние подземных вод в случаях, когда взаимосвязи фактически или потенциально выявлены).

Исходные материалы. Использованы материалы исследований, выполненных в ТПУ в 2002–2023 гг. под руководством и/или при участии С.Л. Шварцева, Е.А. Солдатовой, Н.В. Гусевой, О.Г. Савичева и других, в том числе результаты полевых исследований, проведённых при непосредственном участии автора в 2021 г. (Обское болото) и 2022 г. (водосбор озера Поян), опубликованные материалы ряда научных организаций в КНР и РФ, включая: 1) гидрогеохимическую информацию: 1.1) подземные воды юго-востока Западной Сибири – 341 проб, включая воды отложений: 1.1.1) четвертичных (грунтовые) – 164; 1.1.2) палеогеновых (артезианские) – 81; 1.1.3) меловых (артезианские) – 86; 1.1.4) палеозоя – 10; 1.2) подземные воды в водосборе озера Поян (грунтовые) – 29; 1.3) болотные воды на юго-востоке Западной Сибири – 134, включая воды болот типов: 1.3.1) низинного – 40; 1.3.2) переходного – 32; 1.3.3) верхового – 62; 1.4) воды водно-болотных угодий (ветландов) в водосборе озера Поян – 12, включая: 1.4.1) воды

неиспользуемых в хозяйственном отношении ветландов – 7; 1.4.2) рисовых полей в пределах ветландов – 5; 1.5) сточные воды – 7, включая: 1.5.1) 3 пробы хозяйственно-бытовых стоков, поступающих в Обское болото в районе с. Мельниково (Томская область); 1.5.2) хозяйственно-бытовых (2) и производственных (2) сточных вод, поступающих в р. Цзиньцзян (элемент системы р. Цзиньцзян – р. Ганьцзян – озеро Поян – р. Янцзы); 1.6) водные вытяжки из торфов Обского болота и отложений ветландов в водосборе озера Поян, включая: 1.6.1) пробы торфов и минерального грунта через 0,25 м в пяти скважинах на Обском болоте в марте и октябре 2021 г. – 109; 1.6.2) в ветландах в водосборе озера Поян – 4; 2) опубликованную информацию, полученную на постах сети государственного мониторинга, в том числе материалы наблюдений за уровнями воды р. Обь у п. Победа (с 1965 г.) и в ряде других створов, уровнями и расходами воды р. Шегарка у с. Бабарыкино (с 1933 г.), уровнями подземных вод в с. Мельниково Томской области; уровнях болотных вод Баксинского болота в 1961–1969 гг. и т.д.; аналогичная (опубликованная) информация по водосбору озера Поян; 3) опубликованные сведения о глубинах торфяной залежи и свойствах торфов Обского болота.

Научная новизна. Впервые количественно охарактеризованы размеры зоны влияния болот на подземные воды в южной части Томской области (РФ). Впервые выявлены особенности взаимосвязей подземных и болотных вод, заключающиеся в сопряженности поверхности долинного болота и кривой депрессии подземных вод по направлению от границы болота к реке. Впервые количественно показано, что существуют статистически значимые связи между химическим составом грунтовых вод и вод низинных болот; между химическим составом подземных вод и вод верховых болот значимые связи не выявлены, соответственно нет оснований говорить о взаимовлиянии аномалий содержания железа в верховых болотах и подземных водоносных горизонтах. Количественно оценены масштабы влияния возможного антропогенного загрязнения болот на связанные с ними подземные воды.

Научные положения, выносимые на защиту

1. На юго-востоке Западной Сибири (РФ) взаимодействие поверхностных и подземных вод в разрезе в основном ограничено глубинами 110–120 м, а в плане приурочено к участкам переменного напора подземных вод на границе болот; влияние болотных вод на режим подземных вод наиболее вероятно в летне-осеннюю межень, когда возможен переток болотных вод в сторону от долинного болота к водоразделу на участках 800–900 м, а также увеличивается инфильтрация.

2. Наибольшее влияние подземных вод на химический состав болотных вод на юго-востоке Западной Сибири характерно для краевых частей низинных долинных болот, где происходит разгрузка напорных подземных вод с более высокими, по сравнению с болотными водами, значениями минерализации и рН, наименьшее (вплоть до отсутствия) – для водораздельных верховых болот; напротив, болота оказывают существенное воздействие на состояние, преимущественно, грунтовых вод, что проявляется

в снижении их минерализации и pH; в водосборе озера Поян значимое влияние водно-болотных угодий связано, в основном, с поступлением в грунтовые воды соединений фосфора и снижением pH.

3. Болота юго-востока Западной Сибири (РФ) и водно-болотные угодья в водосборе озера Поян (КНР) характеризуются значительной способностью к самоочищению, вследствие чего загрязнение в первом случае обычно приурочено к верхней части торфяной залежи до глубин 1,5–2,0 м, а во втором – снижается с уменьшением диаметра частиц грунта; в случае кратковременного загрязнения болот и водно-болотных угодий антропогенное влияние на подземные воды маловероятно, а в случае длительного загрязнения – наиболее ощутимо для грунтовых вод суходолов на границе низинных болот.

Достоверность результатов работы. Достоверность результатов исследования определяется: 1) применением современных высокоточных методов химического анализа и выполнением определений в аккредитованной лаборатории ТПУ; 2) использованием статистического и экспертного анализа данных наблюдений с учётом нормативных требований, принятых в КНР и РФ; 3) апробацией результатов исследования в процессе публикаций в рецензируемых журналах («Известия Томского политехнического университета», «Разведка и охрана недр» и докладов на научных конференциях.

Практическая значимость работы. Результаты исследования являются научной основой для: 1) эксплуатации подземных водозаборов на заболоченных и прилегающих к ним территориях; 2) оптимизации сети государственного мониторинга водных объектов и геологической среды в водосборе озера Поян; 3) проведения учебных занятий по гидрогеологии и геоэкологии в университетах КНР и РФ. Результаты исследования использованы при проведении научных исследований в ТПУ, выполненных при поддержке грантов РФФИ БРИКС_Т № 18-55-80015 (полевые и лабораторные работы в водосборе озера Поян в 2019 г. и на Обском болоте в 2021 г.) и РНФ № 23-27-00039 (лабораторные работы в 2022 г.).

Апробация работы. Основные положения диссертации: 1) опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК; 2) в одной статье – в иных журналах и сборниках; 3) докладывались и обсуждались на 7 Международной научной конференции в г. Сиань, Китай, в ноябре 2021 г. (The 7th International Conference “Water Resource and Environment”, на научной конференции достижений Восточно-китайского технологического университета в октябре 2022 г., на Международных научных симпозиумах им. Академ. Усова в ТПУ (апрель 2022 и 2023 гг.).

Личный вклад автора. Автором лично сформулированы защищаемые положения на основе полевых работ и анализа данных, значительная часть которых получена лично в 2021–2023 гг. В том числе, автором в марте 2021 г. были отобраны 7 проб болотных вод на Обском болоте и 1 проба подземных вод на прилегающих к нему территориях, в октябре 2022 г. (совместно с Чжоу Дянь) – 3 пробы подземных вод, 4 пробы речных вод, 3 пробы воды

неиспользуемых ветландов, 1 проба воды с рисового поля, 4 пробы донных отложений рек, 4 пробы отложений ветландов в водосборе озера Поян (КНР), выполнены сбор, обобщение и анализ геохимических данных, на основе которых выявлены основные особенности состояния водных объектов в исследуемой части Обского болота и ветландов в водосборе озера Поян и проанализированы природно-антропогенные условия его формирования.

Структура и объём диссертации. Диссертация объёмом 155 страниц машинописного текста состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 294 наименований, содержит 42 рисунка и 27 таблиц.

В *первой главе* охарактеризована изученность проблемы взаимосвязи подземных и болотных вод и непосредственно основных объектов исследования, а также изложены используемые термины и определения. Во *второй главе* приведены сведения об объектах и методике исследования. В *третьей главе* описаны условия формирования подземных и болотных вод в районе Обского болота и в водосборе озера Поян. В *четвертой главе* приведен расчет и анализ уравнений водного баланса Обского болота и его водосбора, изменения фильтрационных свойств грунтов по глубине, кривых депрессии подземных и болотных вод, на основе чего оценены вертикальные и горизонтальные границы зоны взаимодействия подземных и поверхностных вод. В *пятой главе* выполнен анализ взаимосвязей между химическим составом подземных и болотных вод в Томской области и провинции Цзянси, в том числе посредством проверки на однородность гидрогеохимических данных. В *шестой главе* проведена оценка влияния загрязнения болот на состояние подземных вод по результатам эксперимента на Обском болоте и материалам изучения ветландов в водосборе озера Поян.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, д.г.н., профессору Олегу Геннадьевичу Савичеву за его внимательное руководство в течение последних трех лет, а также его поддержку и помощь в научно-исследовательской работе; и признательность и благодарность руководителю отделения геологии к.г.-м.н. Н.В. Гусевой, д.г.-м.н за ее контакт и общение с китайскими коллегами. Автор искренне благодарен за ценные замечания по содержанию работы и её апробации д.г.-м.н., профессору Е.М. Дутовой, д.г.-м.н., профессору Е.Г. Язикову, д.г.-м.н., доценту О.Е. Лепокуровой и всему коллективу отделению геологии ИШПР ТПУ, д.г.-м.н. А.М. Плюснину, своим друзьям и коллегам в Восточно-китайском технологическом университете и в Куньминском университете науки и технологий в КНР.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение

На юго-востоке Западной Сибири (РФ) взаимодействие поверхностных и подземных вод в разрезе в основном ограничено глубинами 110–120 м, а в плане приурочено к участкам переменного напора подземных вод на границе болот; влияние болотных вод на режим подземных вод наиболее вероятно в

летне-осеннюю межень, когда возможен переток болотных вод в сторону от долинного болота к водоразделу на участках 800–900 м, а также увеличивается инфильтрация.

Анализ гидрогеодинамических условий взаимодействия подземных и болотных вод выполнен в основном по данным, полученным на Обском болоте в Томской области РФ, и включал в себя: 1) составление водного баланса Обского болота и его водосбора с целью оценки инфильтрации Inf при допущении равенства в среднемноголетнем разрезе инфильтрации и подземного стока; 2) расчет по уравнению Дюпюи отношения инфильтрации Inf к коэффициенту фильтрации $k_f(D)$ с последующим определением его среднего значения по разрезу; 3) расчет изменения по глубине средневзвешенных значений коэффициента фильтрации $k_f(Z)$ по данным измерений; определение глубины активного взаимодействия поверхностных и подземных вод как точки пересечения $k_f(D)$ и $k_f(Z)$; 4) построение и анализ кривых депрессии подземных и болотных вод с целью определения горизонтальных границ взаимного влияния подземных и болотных вод (с количественной оценкой по уравнению Дюпюи).

Данные режимных наблюдений за уровнями болотных вод на низинном Обском болоте отсутствуют, но имеются для низинного Баксинского болота (болото расположено в системе «р. Бакса – р. Шегарка – р. Обь»), расположенного к юго-западу от Обского болота (в 120–170 км) в сходных природных условиях. Поэтому первоначально математическая модель водного баланса была составлена для Баксинского болота, а ряд ее параметров использован при расчете водного баланса Обского болота и его водосбора (первый этап исследования).

Анализ годовых сумм атмосферных осадков в геометрическом центре водосбора р. Баксы у с. Пихтовка позволил выявить (с уровнем значимости 5 %) условно однородный период с 1966–1975 гг. С учетом этого, а также принимая во внимание период наблюдений за уровнями вод Баксинского болота 1961–1969 гг., выполнен расчет элементов водного баланса водосбора р. Баксы у с. Пихтовка и болот на этой территории. Сравнение результатов расчета показало, что сток с болот составляет примерно 161 % от суммарного стока с водосбора р. Баксы, а испарение с болот – около 83 % от суммарного испарения с поверхности водосбора. Следствием более высоких значений слоя стока на болоте является накопление воды на его границе, что способствует заболачиванию суходолов. Характер водообмена болота с подземными водоносными горизонтами определяется сперва некоторым накоплением воды в период снеготаяния, затем притоком (в мае–июне) подземных вод с прилегающих неболотных территорий и увеличением инфильтрации в августе–октябре.

С использованием параметров, полученных для водосбора р. Баксы, выполнена оценка элементов водного баланса Обского болота и его водосбора за 1966–2019 гг. Проверка на однородность выборок за периоды 1966–1992 гг. и 1993–2019 гг. показала, что значимое изменение отмечено только для

расчетных слоев водного стока с болота: фактическое значение критерия Стьюдента $k_S=2,17$ при критическом значении $k_{S,5\%}=2,01$. Нарушение однородности также отмечено при разделении ряда 1966–2019 гг. на границе с 1982 по 1986 гг. и с 1989 по 1994 гг., однако при разделении ряда по годам за пределами указанных интервалов гипотеза об однородности не отвергнута. Для изменений влагозапасов значимые изменения не выявлены для всего ряда 1966–2019 гг. С учетом этого указанный период ориентировочно можно рассматривать как однородный с точки зрения условий формирования водного режима. Для Обского болота, также как и для Баксинского, испарение с болота меньше испарения с водосбора в целом, а сток, напротив, больше, но уже не на 161 %, а на 105 %. Коэффициенты влагопроводности торфов резко возрастают во время весеннего половодья, но в Баксинском болоте уже в июле они резко снижаются, тогда как в Обском болоте достаточно высокие их значения сохраняются на начало зимней межени.

Безусловно, выполненные расчеты сопряжены со значительными погрешностями (до 10–20 %), но все же можно предположить, что расположение болота в долине такой большой реки, как Обь, оказывает существенное влияние на его водный режим, фильтрационные свойства торфов и, как следствие, эволюцию всей болотной экосистемы. В частности, долинное Обское болото, в сравнении с Баксинским, в большей степени ограничено в дальнейшем территориальном расширении и характеризуется более интенсивным водообменом с подземными горизонтами. Последнее обстоятельство обеспечивает постоянство водно-минерального питания болотной растительности. В Баксинском же болоте (точнее, на его отдельных участках, сложенных глинистыми грунтами) более вероятна постепенная кольтматация пограничного слоя в нижней части торфяной залежи с постепенным распространением растительности, лучше приспособленной к мезотрофным и затем олиготрофным условиям. Все это может приводить к формированию среди пространства евтрофных болот островов олиготрофного ярма (сосново-сфагново-кустарничковых верховых болот).

Результаты (балансового) расчета водообмена между подземными водами и водами Баксинского и Обского болот в целом согласуются с расчетами инфильтрации на междуречье рек Обь и Шегарка по уравнению Дюпюи. В период весеннего половодья в результате таяния снега, водоотдачи из снегового покрова и оттаивания сезонно промерзших грунтов происходит увеличение влажности, коэффициентов влагопроводности грунтов и водоотдачи из торфяных болот. При этом скорость условно горизонтального перемещения водных масс на поверхности и в подземных водоносных горизонтах в русловую сеть и понижения рельефа превышает скорость инфильтрации. Это приводит к снижению удельной инфильтрации на междуречном пространстве на фоне общего увеличения уровней подземных вод и отсутствия подпора от р. Оби (рис. 2).

Максимумы же инфильтрации приурочены к осеннему периоду (рис. 2), когда совпадают три условия: 1) эффективное атмосферное увлажнение

(дожди в конце лета и осенью при снижении испарения); 2) относительно благоприятные фильтрационные свойства грунтов (отсутствие пересыхания и перемерзания верхних слоев геологического разреза); 3) освобождающаяся емкость подземных горизонтов. Отсутствие какого-либо из указанных факторов приводит к нестабильному и плохо прогнозируемому поступлению влаги в подземные водоносные горизонты.

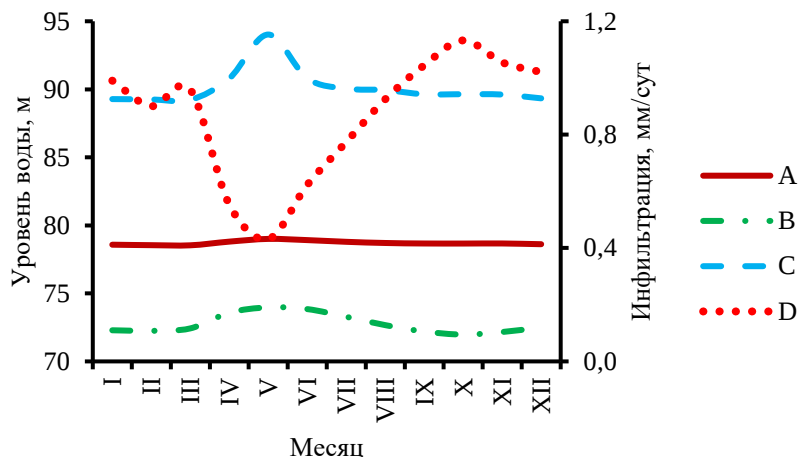
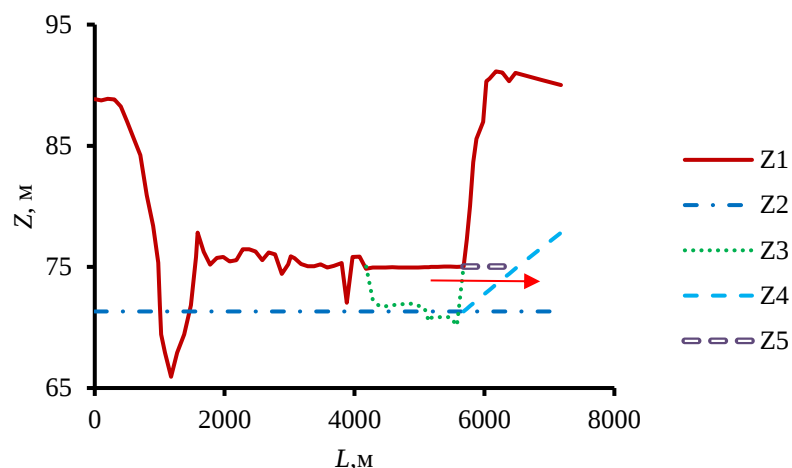
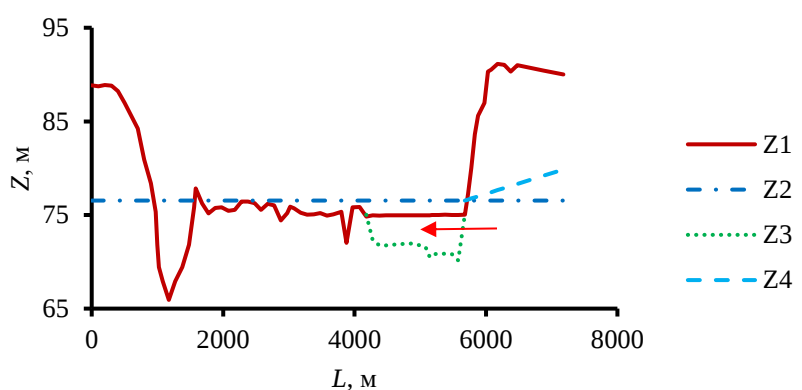


Рисунок 2 – Внутригодовое изменение (в среднем за многолетний период) уровней подземных (A) и речных вод (B – р. Обь у с. Победа; C – р. Шегарка у с. Бабарыкино), инфильтрации в междуречье Обь–Шегарка (D)

Сопоставление среднемесячных уровней подземных вод в палеоген-четвертичном горизонте у с. Мельниково, уровней воды р. Оби у с. Победы и р. Шегарки у с. Бабарыкино подтвердило преобладание нисходящего режима взаимодействия подземных вод водоносных отложений палеогенового возраста и вод р. Оби (рис. 3). В то же время выявлен ряд важных особенностей. Во-первых, можно предположить, что развитие Обского болота ограничено амплитудой колебания уровней воды р. Оби с учетом продолжительности их стояния, при которых происходит береговая инфильтрация и фильтрация воды в пойме. Во-вторых, при низких и средних значениях уровня воды в р. Оби поверхность Обского болота выше отметки сопряжения уровней подземных и речных вод. Вследствие этого существует высокая вероятность фильтрации болотных вод в сторону с. Мельниково на расстояние до 840 м. При очень высоких уровнях воды возможен сценарий, при котором по мере спада половодья пойменные воды сливаются с болотными, вымывают часть органики из торфяной залежи и выносят их в русловую сеть. В-третьих, значение коэффициента фильтрации $k_{f0}=9,88$ м/сут, полученное при решении уравнения Дюпюи, может рассматриваться как средневзвешенное по мощности водоносных отложений. С учетом средних значений фильтрационных свойств этих отложений по разрезу междуречья Икса–Шегарка–Обь глубина зоны активного и условно активного взаимодействия поверхностных и подземных вод составляет 110–120 м (рис. 4) и на значительной части этой территории ограничена снизу малопроницаемыми глинистыми отложениями палеогенового возраста.



a



b

Рисунок 3 – Схематичный поперечный профиль долины р. Оби у с. Мельниково; L – расстояние от условного начала на правом берегу р. Оби (с. Победа); высотные отметки Z : $Z1$ – поверхность водосбора, дна р. Оби, ее проток и стариц, поверхности Обского болота; $Z2$ – среднемесячный уровень воды в р. Оби (за 1967–2015 гг.): *a* – минимальный среднемесячный; *b* – максимальный среднемесячный; $Z3$ – дно Обского болота; $Z4$ – уровень кривой депрессии от скважины 63р у с. Мельниково; $Z5$ – уровень болотных вод, при котором возможен их переток в водоносные отложения четвертичного возраста на границе болота (расстояние по оси абсцисс – зона влияния болотных вод); стрелками показаны направления возможных перетоков

Таким образом, выполнена количественная оценка элементов водного баланса Баксинского и Обского болот, а также их водосборов. Установлено, что при заболачивании с преимущественным распространением низинных болот происходит уменьшение испарения с поверхности и увеличение слоя водного стока. Это приводит к дополнительному переувлажнению примыкающих к болотам суходолов и дальнейшему заболачиванию территории.

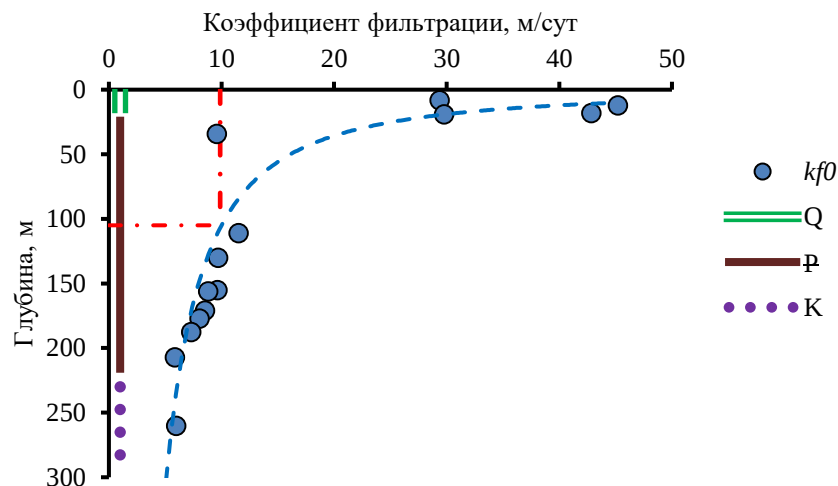


Рисунок 4 – Изменение средневзвешенного (по мощности отложений) коэффициента фильтрации k_{f0} : $k_{f0}=130,861 \cdot Z^{-0,545}$, где Z – глубина; $R^2=0,85$ (по результатам сопоставления расчетов водного баланса и кривой депрессии подземных вод между р. Обь и Шегарка с учетом данных по скв. 63р) $Z=114$ м; возраст отложений: Q – четвертичный период; Р – палеоген; К – мел; пунктиром показана схема определения глубины активного водообмена по значению $k_{f0}=9,88$ м/сут, полученному при решении уравнения Дюпюи

На эволюцию болотных экосистем при прочих равных условиях существенное влияние оказывает геоморфологическое положение, размер и водный режим рек. В рамках дополнительного обоснования этого вывода (второй этап исследования) была построена упрощенная гидрогеодинамическая модель Обского болота при допущениях: 1) подземные и болотные воды образуют единый поток от водораздела в сторону реки Обь; 2) их водный режим можно рассматривать как цепь из стационарных состояний, каждое из которых соответствует месячному интервалу; 3) структура модели разрабатывается и апробируется для элементов месячного водного баланса в среднем за многолетний период и для периода с 18 марта по 16 октября 2021 с приблизительным выделением месячных интервалов; 4) внутри потока выделяются три характерных участка: L_1) суходол, прилегающий к границе Обского болота со стороны водораздела Обь – Иртыш; L_2) участок Обского болота; L_3) участок поймы реки Обь от границы Обского болота до уреза речных вод. Апробация модели показала удовлетворительную сходимость с наблюдаемым состоянием Обского болота по состоянию на 18 марта и 16 октября 2021 г. в пунктах опробования торфяной залежи (в рамках IV этапа исследования) и в узловых точках расчетного профиля. Один из выводов, который можно сделать по результатам анализа расчетного профиля в разные месяцы гидрологического года (как в 2021 г., так и в среднем за многолетний период), заключается в том, что поверхность Обского болота в целом соответствует кривой депрессии подземных вод (рис. 5).

Следовательно, эволюция болотной экосистемы контролируется условиями взаимодействия подземных, речных и болотных вод. Другой, не менее важный вывод заключается в том, что на границе Обского болота с суходолом возможны разнонаправленные движения болотных вод как в сторону Оби, так и в сторону водораздела не только при гипотетическом сценарии на рис. 2а, но и в случае сопряжения кривой депрессии подземных вод с фактически наблюдаемым горизонтом болотных вод, что формально соответствует отрицательным значениям проводимости деятельного горизонта торфяной залежи. Последнее обстоятельство, в свою очередь, приводит к выводу о том, что в ряде случаев возможны колебательные изменения уровня болотных вод при решении уравнения подпертой фильтрации. На основе анализа результатов исследования и указанных фактов и с учётом анализа гидрогеохимических данных сформулировано первое защищаемое положение.

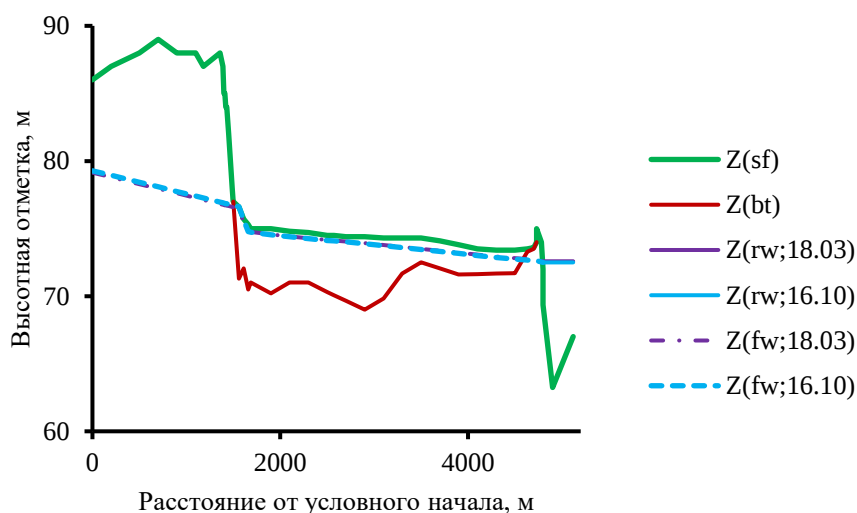


Рисунок 5 – Расчетный профиль Обского болота при допущении сопряжения кривой депрессии подземных вод с поверхностью болотных вод при нисходящем режиме взаимодействия подземных и поверхностных вод; $Z(sf)$ – высотная отметка земной поверхности; $Z(bt)$ – отметка дна болота; $Z(rw; 18.03)$ и $Z(rw; 16.10)$ – уровень воды реки Обь в створе расчетного профиля; $Z(fw; 18.03)$ и $Z(fw; 16.10)$ – расчетный уровень болотных вод

Второе защищаемое положение

Наибольшее влияние подземных вод на химический состав болотных вод на юго-востоке Западной Сибири характерно для краевых частей низинных долинных болот, где происходит разгрузка напорных подземных вод с более высокими, по сравнению с болотными водами, значениями минерализации и pH, наименьшее (вплоть до отсутствия) – для водораздельных верховых болот; напротив, болота оказывают существенное воздействие на состояние, преимущественно, грунтовых вод, что проявляется в снижении их минерализации и pH; в водосборе озера Поян значимое влияние водно-

болотных угодий связано, в основном, с поступлением в грунтовые воды соединений фосфора и снижением pH.

На третьем этапе исследования было проведено сопоставление данных о составе подземных вод и вод ветландов в Западной Сибири и в водосборе озера Поян, которое заключалось в оценке возможности миграционных потоков в системе «болото – подземный водоносный горизонт» в различных природных условиях (в Томской области и провинции Цзянси) путем расчета статистических параметров гидрогеохимических показателей и проверки на однородность по среднему и дисперсии выборок для подземных вод в отложениях разного возраста и вод болот разного типа. Отсутствие статистически значимых отличий между сравниваемыми выборками является основанием для вывода о наличии связей между водными объектами с принятым уровнем значимости (5%). Дополнительно проводились изучение распределения ряда веществ по глубине торфяной залежи в Томской области и сопоставление концентраций в рядом расположенных пунктах наблюдений за грунтовыми водами и водами ветландов в водосборе озера Поян.

Анализ имеющейся информации по болотам Западной Сибири показал, что воды деятельного горизонта торфяной залежи верховых и переходных болот в ненарушенном состоянии в среднем за многолетний период – пресные с очень малой минерализацией, чаще гидрокарбонатные кальциевые, в ряде случаев – сульфатные кальциевые, низинных болот – пресные со средней и повышенной минерализацией, преимущественно гидрокарбонатные кальциевые. Загрязненные воды низинного Обского болота (в среднем) – солоноватые, гидрокарбонатные натриевые [Иванова и др., 2020]. Воды верховых и переходных болот – обычно кислые, низинных болот – слабокислые и нейтральные; табл. 1). Все болотные воды содержат большое количество органических веществ (воды с повышенной перманганатной окисляемостью), NH_4^+ , NO_2^- , Fe [Савичев, 2015].

Таблица 1 – Средние арифметические (A) значения гидрогеохимических показателей и погрешности их определения (δ_A)

Район	Объект	Показатель	pH, ед. pH	$\Sigma_{\text{ми}}$, мг/дм ³	NH_4^+ , мг/дм ³	Fe, мг/дм ³	ПО, мгО/дм ³
Васюганское Болото	ГМК	A	4,86	32,1	2,26	1,29	88,36
		δ_A	0,22	9,6	0,68	0,18	5,71
	рям	A	4,44	30,6	4,24	2,09	89,09
		δ_A	0,13	5,8	0,54	0,16	4,97
	ПБ(В)	A	4,80	68,1	2,12	2,12	100,26
		δ_A	0,23	22,9	0,58	0,38	17,20
	НБ(В)	A	5,56	153,7	3,50	8,53	63,13
		δ_A	0,47	77,1	0,66	4,44	9,54
	ПВ(Q)	A	7,19	350,5	0,55	2,21	3,41
		δ_A	0,07	11,2	0,10	0,31	0,14
	ПВ(P)	A	7,52	637,6	2,24	5,42	3,31

Район	Объект	Показатель	pH, ед. pH	Σ_{mi} , мг/дм ³	NH_4^+ , мг/дм ³	Fe, мг/дм ³	ПО, мгО/дм ³
	ПВ(К)	δ_A	0,15	23,5	0,34	1,43	0,42
		A	8,10	878,3	нд	0,70	2,70
		δ_A	0,29	31,2	нд	0,06	0,19
Тимирязевское болото	ПБ(Т)	A	4,97	36,8	5,66	1,01	249,30
		δ_A	0,44	9,9	1,70	0,08	93,62
	ПВ(Q)	A	7,17	474,2	0,75	3,04	3,11
		δ_A	0,14	25,0	0,18	0,98	0,25
	ПВ(Р)	A	7,45	484,4	0,82	2,17	1,92
		δ_A	0,05	18,6	0,07	0,16	0,17
	ПВ(К)	A	8,00	750,2	1,00	4,80	1,60
		δ_A	0,59	55,8	0,00	0,22	0,20
	ПВ(Pz)	A	7,97	463,7	0,83	3,18	1,98
		δ_A	0,13	34,3	0,19	0,67	0,31
Обское болото	Стоки	A	7,88	1379,4	101,17	4,22	141,84
		δ_A	0,17	222,4	14,99	1,74	89,96
	НБ(М)	A	7,43	1153,7	31,27	33,52	77,55
		δ_A	0,08	70,2	8,85	14,63	27,72
	НБ(Н)	A	7,36	578,6	1,36	19,62	36,55
		δ_A	0,06	36,4	0,77	11,46	16,91
	ПВ(Q)	A	7,76	423,8	0,73	3,19	3,12
		δ_A	0,17	58,3	0,49	0,91	2,69
	ПВ(Р)	A	7,59	726,8	1,20	1,48	2,44
		δ_A	0,42	306,4	1,77	1,47	1,64
	ПВ(К)	A	7,48	2540,9	3,18	5,73	2,00
		δ_A	0,27	27,3	0,40	1,31	0,35
Водосбор озера Поян	Ветланд	A	6,46	94,8	0,26	1,68	–
		δ_A	0,21	17,1	0,05	0,77	–
	ПВП	A	6,40	177,1	1,13	5,41	1,51
		δ_A	0,07	16,5	0,32	2,11	0,62

Примечание: объекты исследования: ГМК – верховой глядово-мочажинный и глядово-мочажинно-озерковый комплексы; рям – верховое болото с преобладанием в растительном покрове сосны, кустарничков и сфагновых мхов; ПБ – переходное болото, в том числе ПБ(В) – переходный участок Васюганского болота, ПБ(Т) – Тимирязевское болото; НБ – низинное болото, в том числе НБ(В) – низинный участок Васюганского болота, НБ(М) – загрязненное низинное болото у с. Мельниково, НБ(Н) – «фоновое» низинное болото у с. Нащекково; ПВ – подземные воды, в том числе в отложениях возраста: ПВ(Q) – четвертичного, ПВ(Р) – палеогенового, ПВ(К) – мелового, ПВ(Pz) – палеозойского; стоки – хозяйственно-бытовые сточные воды

с. Мельниково; ПВП – подземные воды в водосборе оз. Поян (средняя глубина 11 м); Σ_{mi} – сумма главных ионов; ПО – перманганатная окисляемость

Изученные грунтовые воды, приуроченные к четвертичным отложениям, – обычно пресные со средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые, нейтральные или слабощелочные, артезианские воды отложений палеогена и воды зоны трещиноватости в палеозойских образованиях – пресные со средней и повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые, также нейтральные или слабощелочные. Подземные воды в отложениях мела заметно отличаются от других подземных вод и в целом характеризуются как пресные с повышенной минерализацией или солоноватые, гидрокарбонатные натриевые или хлоридные натриевые, слабощелочные. Все подземные воды имеют значительно меньшую, по сравнению с болотными водами, перманганатную окисляемость, но содержат сопоставимые валовые количества железа.

Проверка на однородность показала, что состояние болотных и подземных вод сопоставимо: 1) по величине рН – в случае подземных вод отложений четвертичного и мелового возрастов и вод низинного Обского болота (и на загрязненном, и на фоновом участках); 2) по сумме главных ионов – для вод низинного Обского болота (фоновое) и подземных вод четвертичных отложений; 3) по содержанию общего железа – для подземных вод отложений палеогена и вод низинного участка Васюганского болота (табл. 2, рис. 6). Эти факты позволяют предположить, что, во-первых, статистически значимые взаимосвязи между гидрогеохимическими показателями подземных и болотных вод в подтаежной и южно-таежной подзонах Западной Сибири (на юге и юго-востоке Томской области) характерны в основном для низинных болот. Во-вторых, важное значение имеет приуроченность низинных болот к зонам нарушений, в пределах которых повышается вероятность разгрузки напорных подземных вод. В частности, именно с этим явлением связано достаточно высокое содержание растворенных солей в водах низинного Обского болота (табл. 1).

Для уточнения указанных выше предположений были изучены изменения химического состава вытяжек из торфов и подстилающих отложений на указанных выше участках Васюганского, Обского и Тимирязевского болот. Полученные при этом результаты, судя по удельной электропроводности водных вытяжек, в целом позволяют подтвердить вывод о наличии разгрузки напорных вод в притеррасной части Обского болота.

Таблица 2 – Отношения фактических и критических значений критериев Стьюдента (t) и Фишера (F) при уровне значимости 5 % между гидрогеохимическими показателями подземных и болотных вод в Томской области

Показатель	Болотные воды	Подземные воды							
		ПВ(Q)		ПВ(P)		ПВ(K)		ПВ(PZ)	
		t/t_5	F/F_5	t/t_5	F/F_5	t/t_5	F/F_5	t/t_5	F/F_5
рН	ГМК	5,81	0,53	4,94	0,57	3,45	8,62	нд	нд
	Рям	9,83	0,69	7,12	0,75	5,82	9,54	нд	нд
	ПВ(В)	6,38	0,92	4,73	0,98	3,88	5,73	нд	нд
	НБ(В)	2,45	0,30	2,40	0,32	1,59	5,76	нд	нд
	ПВ(Т)	3,11	0,63	5,13	3,70	1,16	4,82	3,24	1,94
	НБ(М)	0,82	0,07	0,17	14,01	0,10	0,17	нд	нд
	НБ(Н)	1,18	0,13	0,22	25,69	0,28	0,31	нд	нд
Σ_{mi}	ГМК	5,20	7,16	10,31	3,42	8,65	39,34	нд	нд
	рям	8,12	8,02	15,73	3,83	13,58	44,08	нд	нд
	ПВ(В)	5,04	0,95	8,45	0,46	8,93	5,24	нд	нд
	НБ(В)	1,78	0,30	3,76	0,38	4,03	1,84	нд	нд
	ПВ(Т)	4,86	8,30	5,78	7,21	2,95	74,58	5,13	3,31
	НБ(М)	2,20	2,44	0,61	9,02	4,24	11,17	нд	нд
	НБ(Н)	0,91	0,49	0,19	40,22	12,23	2,25	нд	нд
Fe	ГМК	0,55	14,57	1,16	37,00	1,90	1,93	нд	нд
	рям	0,12	7,43	1,54	18,86	4,05	0,98	нд	нд
	ПВ(В)	0,06	2,46	1,06	6,26	2,43	0,67	нд	нд
	НБ(В)	1,87	1,47	0,41	0,35	2,26	8,45	нд	нд
	ПВ(Т)	0,33	587,45	1,03	23,37	2,27	54,46	0,74	58,19
	НБ(М)	0,44	470,07	1,10	34,47	0,40	228,65	нд	нд
	НБ(Н)	0,33	198,56	0,88	14,56	0,28	96,58	нд	нд
ПО	ГМК	21,37	65,90	7,95	49,37	12,25	101,97	нд	нд

Показатель	Болотные воды	Подземные воды							
		ПВ(Q)		ПВ(P)		ПВ(K)		ПВ(PZ)	
		t_f/t_5	F_f/F_5	t_f/t_5	F_f/F_5	t_f/t_5	F_f/F_5	t_f/t_5	F_f/F_5
	рям	18,38	128,52	6,89	96,29	10,49	198,86	нд	нд
	ПБ(В)	6,67	1158,36	2,47	867,88	3,78	1792,39	нд	нд
	НБ(В)	13,85	30,65	5,13	22,97	8,07	47,43	нд	нд
	ПБ(Т)	2,06	9834,19	2,63	15064,41	2,88	8717,40	1,06	21229,5
	НБ(М)	0,57	194,04	1,10	149,16	0,50	15623,77	нд	нд
	НБ(Н)	0,46	49,67	0,91	38,18	0,41	3999,44	нд	нд

Примечание: t_f и F_f – фактические значения критериев Стьюдента и Фишера, соответственно; t_5 и F_5 – значения критериев Стьюдента и Фишера при уровне значимости 5 %; соотношения $t_f/t_5 > 1$ и $F_f/F_5 > 1$ (выделены полужирным шрифтом) свидетельствуют об отклонении нулевой гипотезы об однородности рядов по среднему и дисперсии; курсивом выделены сравниваемые выборки, сопоставимые по составу; прочие обозначения приведены в табл. 1

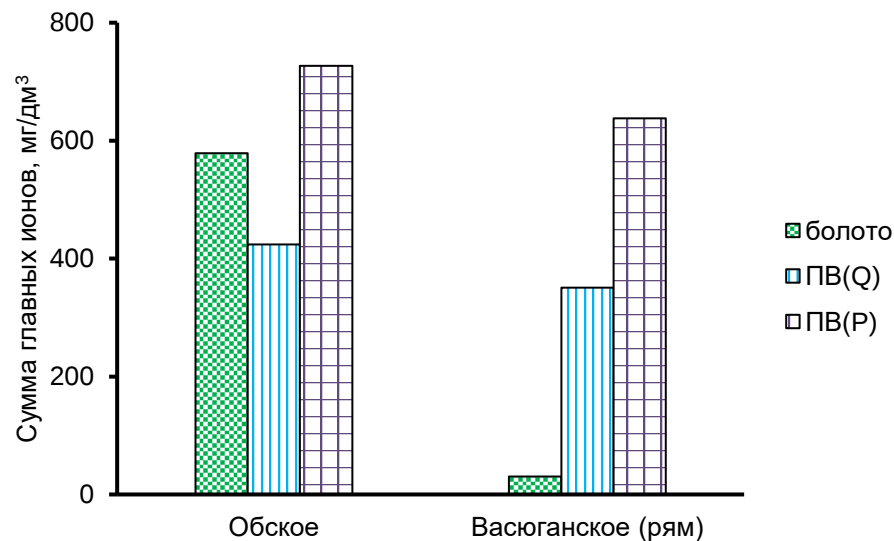


Рисунок 6 – Средние значения суммы главных ионов в водах низинного Обского болота и верхового участка (ряма) Васюганского болота и подземных водах на соответствующих прилегающих (к болоту) территориях; значения суммы главных ионов в водах Обского болота и грунтовых водах статистически не отличимы с уровнем значимости 5% (табл. 2)

Эти воды (подземные) накапливаются как в деятельном, так и инертном горизонтах торфяной залежи в виде линз переобводненного торфа. Размеры линз изменяются в течение года и по площади болота, видимо, в зависимости от общих влагозапасов болота и поступления поверхностных и подземных вод с суходолов. Влияние подземных вод прослеживается и на изменении с глубиной (торфяной залежи) содержаний Fe, но заметное увеличение в придонных слоях отмечается не только для низинного болота, но и для болот других типов.

Используя указанные выше подходы, был проведен анализ связей между подземными водами и водами ветландов в водосборе озера Поян. Изученные воды в целом пресные с малым и средним содержанием растворённых минеральных солей (табл. 1), по химическому составу – гидрокарбонатные кальциевые. По величине pH подземные воды и воды ветландов – слабокислые и нейтральные. Содержание органических веществ в ветландах выше, чем в подземных водах, а сумма главных ионов Σ_{mi} , напротив, ниже, что подтверждается результатами проверки на однородность по среднему (критерий Стьюдента) и дисперсии (критерий Фишера) с уровнем значимости 5% (табл. 3). Но при этом величина Σ_{mi} вод рисовых полей в целом заметно больше, чем вод неиспользуемых ветландов. Кроме проверки на однородность данных, полученных на разных пунктах наблюдений, иногда достаточно удалённых друг от друга, был также выполнен поиск зависимостей между геохимическими показателями подземных вод и вод ветландов посредством корреляционного анализа двух выборок, каждая из которых составлена из шести пар проб, отобранных вблизи друг от друга.

Таблица 3 – Отношения фактических и критических значений критериев Стьюдента (t) и Фишера (F) при уровне значимости 5 % между гидрогеохимическими показателями подземных и болотных вод в водосборе озера Поян

Показатель	t/t_5	F/F_5
pH	0,17	0,94
Σ_{mi}	1,40	0,74
Fe	0,54	5,80
$C_{орг.}$	2,37	2,22

Примечание: t_f и F_f – фактические значения критериев Стьюдента и Фишера, соответственно; t_5 и F_5 – значения критериев Стьюдента и Фишера при уровне значимости 5 %; соотношения $t_f/t_5 > 1$ и $F_f/F_5 > 1$ (выделены полужирным шрифтом) свидетельствуют об отклонении нулевой гипотезы об однородности рядов по среднему и дисперсии

Статистически значимые связи (при уровне значимости 5%) выявлены только для содержаний фосфора в подземных водах и водах ветландов (коэффициент корреляции $0,69 \pm 0,23$). Таким образом, взаимодействие подземных вод и вод ветландов отмечено и в случае водосбора озера Поян.

Оно проявляется в поступлении в меженный период в водоносные горизонты, прежде всего, продуктов трансформации органических веществ, а не их самих. Это свидетельствует, во-первых, о временном лаге между изменениями состояния ветландов и подземных вод, что подтверждается и результатами исследований других авторов, в частности, результатами расчетов взаимовлияния озерных и подземных вод [Song et al., 2023]. Во-вторых, также, как и в случае болот Западной Сибири, можно предположить наличие геохимических и механических барьеров, препятствующих более интенсивным потокам между ветландами и подземными водоносными горизонтами. В-третьих, средняя глубина залегания изученных подземных вод в водосборе озера Поян составляет 11 ± 1 м, что пока позволяет ограничить вывод о значимом влиянии ветландов на химический состав только применительно к грунтовым водам преимущественно в отложениях четвертичного возраста. В случае напорных вод в более глубоких водоносных горизонтах требуются дальнейшие исследования.

В целом, на основе анализа данных гидрогеохимических наблюдений и результатов анализа гидрогеологических условий сформулировано второе защищаемое положение.

Третье защищаемое положение

Болота юго-востока Западной Сибири (РФ) и водно-болотные угодья в водосборе озера Поян (КНР) характеризуются значительной способностью к самоочищению, вследствие чего загрязнение в первом случае обычно приурочено к верхней части торфяной залежи до глубин 1,5–2,0 м, а во втором – снижается с уменьшением диаметра частиц грунта; в случае кратковременного загрязнения болот и водно-болотных угодий антропогенное влияние на подземные воды маловероятно, а в случае длительного загрязнения – наиболее ощутимо для грунтовых вод суходолов на границе низинных болот.

Анализ гидрогеохимических данных, выполненный в рамках третьего этапа исследования, в целом показал, что химический состав вод ветландов, с одной стороны, взаимосвязан с химическим составом поверхностных и подземных вод, а с другой стороны – характеризуется определённой «автономностью», которая, по сути, и является одним из признаком «самостоятельности» ветландов как особых природных объектов [Савичев, 2021]. Эта «автономность» является важным фактором, в значительной степени препятствующим интенсивной миграции загрязняющих веществ в ветландах и выносу за их пределы в случаях загрязнения ветландов с учетом потенциально возможного водообмена на границе болота (рис. 2). В рамках анализа этого фактора (четвертый этап исследования) было изучено взаимодействие вод и болотных отложений в водосборе озера Поян (подэтап 4.1) и проведен эксперимент по изучению процессов самоочищения на участке Обского болота (подэтап 4.2).

В октябре 2022 г. совместно с Чжоу Дань автором был проведен отбор проб вод и отложений из ветландов в устьевой области р. Ганыцзян, в том

числе из трех ветландов, не используемых в хозяйственном отношении, и рисового поля. Корреляционный анализ полученных данных (включая данные по составу речных вод и водных вытяжек из донных отложений рек) позволил выявить статистически значимые связи между содержанием целого ряда химических элементов в водных вытяжках и действующим диаметром отложений d_{10} (диаметр, соответствующий ординате 10% по кривой гранулометрического состава). Это, во-первых, объясняется увеличением сорбционной способности грунтов глинистых грунтов по сравнению с песчаными и супесчаными, а во-вторых, с учетом более высоких, чем в речных отложениях, концентраций ряда микроэлементов указывает на наличие достаточно эффективного механизма аккумуляции веществ в отложениях ветландов в водосборе озера Поян.

Для лучшего понимания смысла выявленной зависимости геохимических показателей от d_{10} была проведена апробация модели (1–4):

$$S_m = S_{m,0} \cdot pH^{n_{pH}}, \quad (1)$$

$$k_{p,1} = k_{p,0} \cdot d_{10}^{n_{kp}}, \quad (2)$$

$$k_r = k_{p,1} + k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S), \quad (3)$$

$$C \approx \frac{k_{p,1} \cdot k_{p,2} \cdot C_{eq} + k_s \cdot S}{k_r}, \quad (4)$$

где C и S – концентрация исследуемого вещества в воде и отложениях в момент t ; C_{eq} – равновесная концентрация в воде (принята как среднее геометрическое; S_m – максимальная сорбционная способность отложений; $S_{m,0}$, k_m , k_s , $k_{p,1}$, $k_{p,2}$, k_r , n_{pH} , n_{kp} – коэффициенты. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования этой модели (соответственно, и вывода об увеличении сорбционной способности грунтов с уменьшением d_{10}) для расчета концентраций веществ, которые могут поступать как в результате производственной деятельности (например, W ; потенциальный источник – деятельность горноперерабатывающих предприятий по производству W ; рис. 7), так и вследствие природных процессов (например, Fe ; возможные причины – накопление в водной среде органических соединений железа, а на нижней границе ветландов в отложениях – при изменении окислительно-восстановительной обстановки [Shvartsev, 2008; Крайнов и др., 2004]).

В рамках второй части четвертого этапа исследования был проведен эксперимент на Обском болоте в Томской области РФ, направленный на изучение способности болот региона к самовосстановлению. 18.03.2021 г. на фоновом участке Обского болота у с. Нащеково было пробурено пять скважин, в которых отобраны пробы болотных вод из деятельного горизонта торфяной залежи, а затем – пробы торфа и минеральных отложений поинтервально (через 0,25 м) по всей глубине торфяной залежи до минерального грунта включительно. Четыре скважины (Н1, Н2, Н4, Н5) расположены в вершинах квадрата со стороной 100 м, а пятая (Н3) – в его центре. Одновременно отобраны пробы подземных вод палеогенового комплекса у с. Нащеково. После отбора проб воды и торфов 19.03.2021 г. в 0,5 м от скважины Н3 на

поверхность болота было вылиты 50 л раствора NaCl (20 г/дм^3). 16.10.2021 г. в этих же скважинах и в той же последовательности отобраны пробы болотной воды (из деятельного горизонта), торфа и минеральных отложений. Болотные воды на этом участке 18 марта и 16 октября 2021 г. в целом характеризуются как пресные с повышенной минерализацией, за исключением пробы, отобранной 18.03.2021 г. в скважине Н4, а подземные воды в с. Нащекново – пресные с повышенной минерализацией с общим содержанием растворенных солей, близким к категории «солончатые воды». По химическому составу болотные воды – гидрокарбонатные кальциевые, а подземные воды – гидрокарбонатные натриевые. Болотные воды характеризуются очень высокими значениями окисляемости.

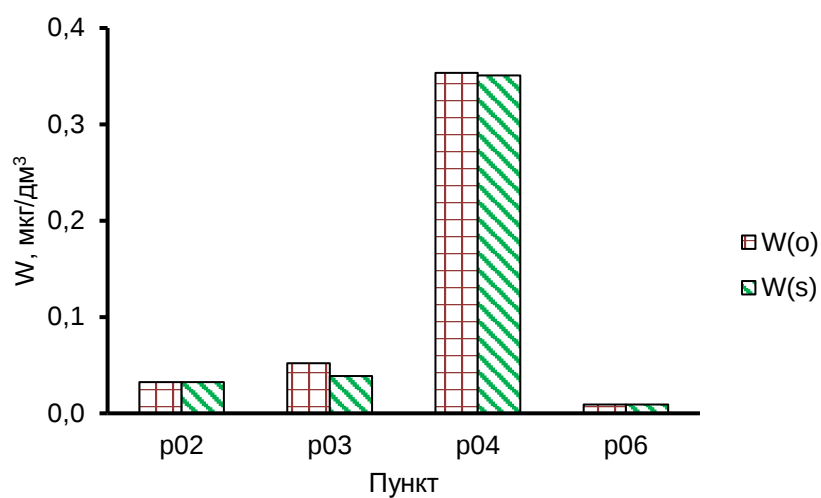


Рисунок 7 – Измеренные (o) и вычисленные (s) концентрации W в водах ветландов в водосборе озера Поян октябре 2022 г.

В результате проведения эксперимента установлено, что выпуск 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм^3 на поверхность евтрофного Обского болота 19 марта 2021 г. привел к формированию по состоянию на 16 октября 2021 г. непосредственно в месте выпуска (центральная скважина Н3) относительно повышенных содержаний Na^+ и Cl^- в деятельном горизонте торфяной залежи и в интервале глубин 1,50–2,00 (в основном, в интервале 1,50–1,75 м). В других скважинах (то есть на удалении от выпуска около 70 м) статистически значимые изменения значений pH, удельной электропроводности EC, концентраций Na^+ и Cl^- в болотных водах, явно связанные с выпуском раствора NaCl у скважины Н3, не выявлены. Таким образом, влияние выпуска ограничено участком с площадью существенно меньше 1 га и глубиной торфяной залежи до 2,0 м (рис. 8).

Вместе с тем, установлено заметное влияние на эколого-геохимическое состояние евтрофного Обского болота притока подземных вод. Это влияние наиболее ощутимо и устойчиво в течение зимы – весны – лета и осени 2021 г. по линии скважин Н1–Н2 на удалении 100 м от внешней границы Обского болота и наименее – по линии скважин Н4–Н5 на удалении 200 м от границы болота. Оно проявляется как непосредственно за счет поступления вод с

минерализацией около 1 г/дм^3 , так и косвенно – путем изменения условий функционирования болотной экосистемы, следствием чего, вероятно, является неравномерное по территории и глубине распределение фильтрационных свойств и влагосодержания грунтов, концентраций химических элементов и соединений (например, содержания фосфатов и карбонатов, в свою очередь, оказывающих влияние на процессы растворения и осаждения).

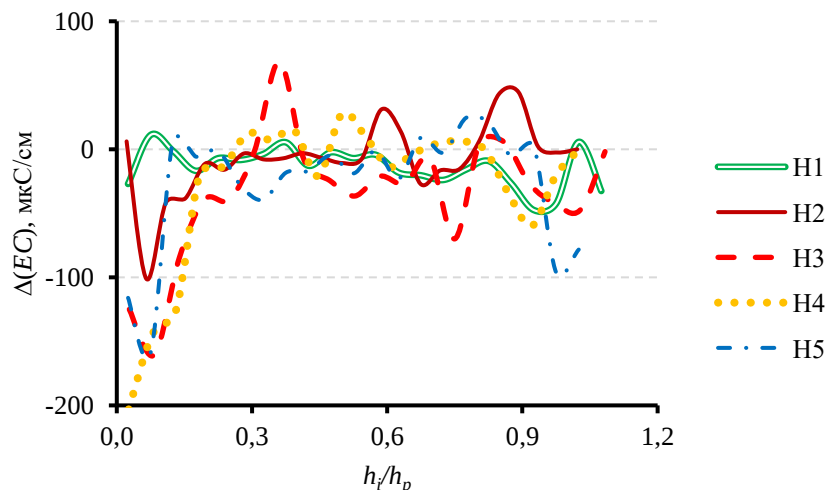


Рисунок 8 – Изменение удельной электропроводности водных вытяжек из торфов по скважинам Н1–Н5 с марта по октябрь 2021 в зависимости от относительной глубины h_i/h_p ; h_i – глубина отбора пробы; h_p – мощность (толщина) торфяной залежи; $\Delta(ЕС) = ЕС_{16.10.21} - ЕС_{18.03.21}$; $ЕС_{дата}$ – удельная электропроводность на дату отбора пробы воды)

В работе [Савичев, Гусева, 2020] было сделано предположение, что олиготрофное болото в условиях таежной зоны в Западной Сибири способно «справиться» в течение 3–5 лет с загрязнением в виде разового поступления нефтепродуктов до 16–17 тонн. Полученные автором совместно с сотрудниками ТПУ результаты в целом подтверждают этот вывод. Так, многолетний сброс хозяйственно-бытовых стоков в Обское болото у с. Мельниково привел к заметному увеличению значений ряда геохимических показателей болотных вод и торфов в верхней части торфяной залежи на участке, ограниченном в основном: вдоль р. Оби – створом около 400 м к северу от выпуска стоков; по поперечному профилю речной долины – створом примерно в 500–700 м от внешней границы болота. Разовое же поступление в это болото относительно небольшого количества растворенных солей, как показало рассматриваемое исследование, оказывает на эколого-геохимическое состояние болотной экосистемы еще меньшее влияние.

С учетом материалов эксперимента и результатов анализа гидрогеодинамических условий была рассмотрена модель стационарной гидродисперсии с аналитическим решением (5):

$$C_x = C_0 \cdot \exp\left(\frac{v}{2 \cdot D} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot k_C \cdot n \cdot D}{v^2}}\right) \cdot x\right), \quad (5)$$

где C_0 и C_x , – концентрации вещества в болотной и подземной воде на расстоянии x от границы болота; v – скорость фильтрации; D – коэффициент гидродисперсии; k_c – константа скорости реакции; n – активная пористость грунта. Её апробация выполнена для содержаний Fe и NH_4^+ по среднемноголетним данным для Обского болота и грунтовых вод в Шегарском районе Томской области РФ. Полученные результаты моделирования (при относительной ошибке менее 1%) свидетельствуют о более чем 20-кратном снижении концентраций Fe в 800–900 м от границы болота и достижении ПДК для вод хозяйственно-питьевого назначения в 1150 м от неё. Достаточно заметно снижаются и концентрации NH_4^+ (рис. 9).

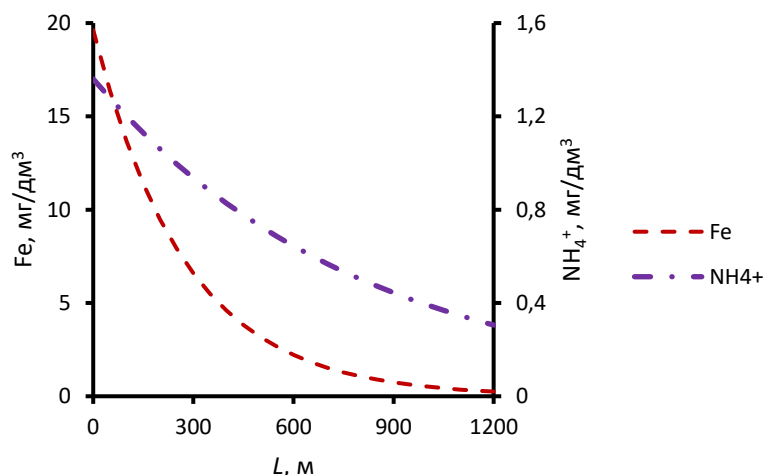


Рисунок 9 – Расчетное изменение концентраций Fe и NH_4^+ в грунтовых водах от границы Обского болота в сторону водораздела

В целом, на основе анализа данных наблюдений и результатов математического моделирования гидрогеохимических процессов сформулировано третье защищаемое положение.

Заключение

На основе данных геохимических исследований, выполненных в 2021–2023 гг., проведены обобщение и анализ данных о гидрогеодинамических и гидрогеохимических условиях на заболоченных территориях на юго-востоке Западной Сибири (Томская область, РФ) и в бассейне озера Поян (провинция Цзянси, КНР). В результате показано, что в исследуемом районе Сибири взаимодействие поверхностных и подземных вод в разрезе в основном ограничено глубинами 110–120 м, а в плане – участками до 800–900 м.

Установлено, что наибольшее влияние подземных вод на химический состав болотных вод на юго-востоке Западной Сибири характерно для краевых частей низинных долинных болот, где происходит разгрузка напорных подземных вод с более высокими, по сравнению с болотными водами, значениями минерализации и pH, наименьшее (вплоть до отсутствия) – для водораздельных верховых болот. Напротив, болота оказывают существенное воздействие на состояние, преимущественно, грунтовых вод, что проявляется в снижении их минерализации и pH. В водосборе озера Поян значимое

влияние водно-болотных угодий связано, в основном, с поступлением в грунтовые воды соединений фосфора и снижением рН.

В целом, изученные болота характеризуются значительной способностью к самоочищению, вследствие чего загрязнение в Сибири обычно приурочено к верхней части торфяной залежи до глубин 1,5–2,0 м, а в водосборе озера Поян – снижается с уменьшением диаметра частиц грунта; в случае кратковременного загрязнения болот и водно-болотных угодий антропогенное влияние на подземные воды маловероятно, а в случае длительного загрязнения – наиболее ощутимо для грунтовых вод суходолов на границе низинных болот.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации (в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ)

1. Савичев О.Г., Ян Хэнь Гидрогеологические и гидрологические условия функционирования Обского и Баксинского болот (юго-восток Западно-Сибирской равнины) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 4. С. 43-56. DOI 10.18799/24131830/2021/4/3147.
2. Савичев О.Г., Гусева Н.В., Хващевская А.А., Иванов А.Ю., Ян Хэн, Чжоу Дань Эксперимент по оценке самоочищения Обского болота (Западная Сибирь, Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 73-84. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3514.
3. Савичев О.Г., Ян Х., Чжоу Д. Гидрогеодинамические и гидрогеохимические условия самоочищения вод Обского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 4. С. 115-125. DOI 10.18799/24131830/2022/4/3656
4. Савичев О.Г., Домаренко В.А., Ян Хэн, Перегудина Е.В. Сравнительный анализ подземных и болотных вод в юго-восточной части Западной Сибири // Разведка и охрана недр. – 2022. – № 5, С. 26–33.

Публикации в других научных изданиях

1. Yang, H., Savichev, O.G. Hydrogeological functions of obskoye and baksinskoye swamps in the southeast of West Siberian Plain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science / IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2022, 958 (1), 012018. DOI: 10.1088/1755-1315/958/1/012018.