

Моисеева Юлия Александровна

**ИЗМЕНЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ**

Специальность 25.00.07 – Гидрогеология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2018

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

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Савичев Олег Геннадьевич

Официальные оппоненты: **Шепелёв Виктор Васильевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе

Иванова Ирина Сергеевна, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеохимии и геоэкологии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, (ИГМ СО РАН г. Новосибирск)

Защита состоится 27 ноября 2018 г. в 16 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 999.170.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте: <http://portal.tpu.council/2799/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.г.-м.н.



О.Е. Лепокурова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Формирование подземного стока и его количественная оценка представляют собой исключительный научный и прикладной интерес. С научной точки зрения, изучение подземного стока способствует дальнейшему уточнению его величины и определению продолжительности циклов круговорота воды в природе, скорости водообмена в верхних частях земной коры, выяснению условий питания и разгрузки водоносных горизонтов. С практической точки зрения, изучение подземного стока может обеспечить успешное решение ряда народнохозяйственных задач, связанных с комплексным использованием и охраной водных ресурсов, целенаправленным управлением поверхностным и подземным стоками, прогнозированием минимальных расходов рек для гидроэнергетического проектирования, судоходства, ирригации, водоснабжения и других отраслей народного хозяйства. Оценка подземного стока производится в зависимости от ряда природных факторов и условий, из которых наибольшее значение имеют климатические особенности, геологическое строение, литологический состав горных пород, характер рельефа и растительности, а также эрозионная деятельность речной сети. Для построения долгосрочных гидрогеологических прогнозов важно не только знать современные изменения климата, режима подземных и поверхностных вод, но и учитывать изменения, происходившие в прошлом. Понимание палеогидрологических и палеогидрогеологических условий является ключом к решению целого ряда гидрогеологических, геоэкологических, геохимических задач и необходимым условием для разработки методов долгосрочного прогноза изменений окружающей среды, в том числе играет важную роль в построении теории формирования геохимических аномалий (природных и антропогенных) и поисков гидрогенных месторождений полезных ископаемых, что определяет актуальность палеогидрологических и палеогидрогеологических реконструкций. Однако методика подобных исследований недостаточно разработана и опирается в основном на методику воднобалансовых расчётов и инженерно-гидрометеорологических изысканий для строительства в современный период либо представляет собой второстепенное приложение к методике климатических реконструкций, которые, в свою очередь, базируются на целом ряде достаточно грубых предположений. В настоящее время используются различные методы палеоклиматических реконструкций для периода голоцена, представленные в работах (Чернавская и др. 1995, Bostonalieva, 2015, Antipina et al. 2014, Prenke-Kraus, 2008, Gaewski 2015, Rui-bo Zhang, 2015, Moller et al., 2015, Соломина, 2010, Назаров и др. 2012). На территории Западной Сибири ранее проводились палеоботанические реконструкции (Antipina, et. al. 2014, Алексеев, 2014, Прейс, 2016 и др.), палинологические (Борисова, 2005, Prenke-Kraus et. al. 2015, Хазина, 2009 и др.), дендрохронологические (Малышева, 2013, Бочкарев, 2006, Rui-bo Zhang et. al., 2015 и др.), палеогляциологические (Окишев, 1984, Moller, 2015 и др.), и др. Также следует отметить, что при планировании и осуществлении хозяйственной деятельности в Западной Сибири (например, проектировании, строительстве и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса) важно учитывать очень высокую и прогрессирующую заболоченность региона, которая обусловлена сочетанием избыточного увлажнения и слабой дренированности водосборов. В свою очередь заболоченность связана с общим и подземным водообменом.

Всё вышесказанное определяет актуальность проводимых в данной диссертационной работе исследований.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – оценка подземного стока таёжной зоны Западной Сибири и обоснование методики его реконструкции в голоцене.

Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи:

1. Определить основные факторы формирования подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири;
2. Выполнить оценку подземного стока на основе выявленных многолетних изменений уровней подземных вод и расходов рек в таёжной зоне Западной Сибири по данным наблюдений до 2015 гг.;
3. Разработать и обосновать новую методику реконструкции подземного стока на основе математической модели суммарного и подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири в голоцене;
4. Построить долгосрочный прогноз изменений подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири.

Объект и методы исследования. Основным объектом исследования являются подземные воды неоген-четверичных и палеогеновых отложений в таёжной зоне Западной Сибири. При реконструкции подземного стока в качестве объектов исследования рассматривались водосборы средних рек таежной зоны Западной Сибири. Для достижения поставленных задач в процессе исследования использовались следующие методы: математического моделирования гидрогеологических процессов, статистический, географо-гидрологический.

Исходные материалы. Использованы данные собственных исследований, выполненных совместно с сотрудниками Томского политехнического университета в 2015–2017 гг., материалы государственного мониторинга поверхностных вод и гидроклиматической информации (средне многолетние данные гидрологических и климатических характеристик по 38 средним рекам Западной Сибири и 64 метеостанциям) с конца XIX века до 2015 г. (Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды), материалы государственного мониторинга геологической среды по Томской области (данные наблюдений за уровнями подземных вод по 15 режимным скважинам, 5 из которых вскрывают воды четвертичных отложений, 2 – неогеновых, 6 – палеогеновых, и 2 – меловых) за период с 1960-х гг. до 2015 г. (Томская геологоразведочная экспедиция, АО «Томскгеомониторинг»).

Научная новизна. Впервые предложена методика реконструкции подземного стока в голоцене, выполнена реконструкция и вероятностный прогноз долгосрочных изменений подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири, выявлены условия, определяющие направление и масштаб изменений режима подземных вод региона.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Модуль подземного стока на территории таёжной зоны Западной Сибири в настоящее время изменяется от 1 до 3,2 л/(с·км²). На протяжении последних 40 лет в таёжной зоне Западной Сибири продолжается рост среднегодовых уровней подземных вод в ненарушенных хозяйственной деятельностью условиях, который в среднем по таёжной зоне Западной Сибири за период с конца 1960-х по 2015 гг. составляет 0,34 м.

2. Разработана и обоснована методика реконструкции подземного стока, основанная на зависимости модуля подземного стока от суммы атмосферных осадков за тёплый период (величина инфильтрационного питания) и коэффициента стока (степень обводнённости горных пород). На основе данной методики показано, что в

последние десятилетия в таёжной зоне Западной Сибири наблюдаются максимальные или близкие к максимальным для голоцена значения подземного стока (24 мм/год).

3. Основным условием увеличения подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири является рост атмосферного увлажнения при различных сценариях изменения температуры воздуха. К концу XXI века при сценарии увеличения температуры воздуха и атмосферного увлажнения увеличение подземного стока будет незначительным.

Достоверность результатов работы. Достоверность результатов исследования подтверждается: 1) использованием данных о расходах и уровнях речных вод, полученных Росгидрометом, данных об уровнях подземных вод, полученных АО «Томскгеомониторинг» и других организаций в системе государственного мониторинга геологической среды; 2) корректным применением статистического и экспертного анализа данных наблюдений с учётом нормативных требований, принятых в Российской Федерации и Всемирной метеорологической организации (ВМО); 3) апробацией результатов исследования в публикациях в рецензируемых научных журналах («Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов», «Вестник Северного Арктического Федерального университета, серия: Естественные науки», «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science» и докладов на международных и всероссийских научных конференциях).

Практическая значимость работы. Результаты исследования являются научной основой для: 1) построения долгосрочного прогноза ресурсов подземных вод в таёжной зоне Западной Сибири; 2) выявления условий формирования геохимических аномалий, связанных с изменением режима подземных вод; 3) нормирования антропогенных воздействий на водные объекты и разработки долгосрочных программ комплексного использования и охраны водных ресурсов на территории Западной Сибири; 4) проведения учебных занятий по гидрогеологии и геоэкологии в университетах Российской Федерации. Материалы диссертационной работы использовались при выполнении работ по гранту РФФИ №17-05-00042 и мегагранту Правительства Российской Федерации (грант 14 Z50.31.0012).

Апробация работы. Основные положения диссертации опубликованы в 9 работах, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, 1 статья в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus; также полученные результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях в Томском политехническом университете, Санкт-Петербургском политехническом университете, Московском государственном университете, Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в получении всех результатов, изложенных в диссертации. На основе, полученных данных при проведении статистического анализа данных расходов и уровней речных вод, уровней подземных вод, температуры атмосферного воздуха и атмосферных осадков, математического моделирования процессов формирования суммарного и подземного стока были сформулированы основные защищаемые положения.

Структура и объём диссертации. Диссертация объёмом 147 страница машинописного текста состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 163 наименований, содержит 27 рисунков и 17 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, д.г.н., профессору Олегу Геннадьевичу Савичеву за постоянное внимание, советы и помощь в работе. За поддержку и ценные критические замечания в процессе выполнения работы искреннюю благодарность автор выражает д.г.-м.н., профессору С.Л. Шварцеву, д.г.-м.н., профессору Л.П. Рихванову, особую благодарность автор выражает д.г.-м.н., профессору А.К. Мазурову, д.г.-м.н., профессору В.К. Попову, руководителю отделения геологии к.г.-м.н. Н.В. Гусевой, всему коллективу отделения геологии и ПНИЛ Гидрогеохимия Национального исследовательского Томского политехнического университета, профессору, члену-корреспонденту РАН И.П. Семелетову, а также д.г.-м.н., профессору О.В. Дудареву и сотрудникам лаборатории арктических исследований ТОИ ДВО РАН.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение

Модуль подземного стока на территории таёжной зоны Западной Сибири в настоящее время изменяется от 1 до 3,2 л/(с·км²). На протяжении последних 40 лет в таёжной зоне Западной Сибири продолжается рост среднегодовых уровней подземных вод в ненарушенных хозяйственной деятельностью условиях, который в среднем по таёжной зоне Западной Сибири за период с конца 1960-х по 2015 гг. составляет 0,34 м.

Задачей региональной оценки подземного стока является получение количественных данных по величине подземного стока для значительных территорий, например, в пределах целого бассейна подземных вод или нескольких бассейнов, района, области и т.д. (Всеволожский, 1973). Значительные исследования по региональной оценке и картированию естественных ресурсов подземных вод и подземного стока отдельных крупных регионов были выполнены отечественными специалистами (Б.И. Куделин, В.А. Всеволожский, Р.Г. Джамалов, И.В. Зеленин, И.С. Зекцер, В.М. Шестопалов, В.А. Карпова, Н.А. Лебедева, О.В. Попов, А.П. Лавров, В.И. Клименко, М.Л. Марков и др.). Масштабы гидрогеологической изученности таежной зоны Западной Сибири позволяют выполнить комплексную оценку подземного стока.

Среди последних работ по изучению и оценке подземного стока, выполняемых на территории исследования можно выделить работы В. А. Лыготина, О. Г. Савичева и Ю. В. Макушина (Лыготин и др., 2010, Савичев и др., 2004, 2011), посвященные анализу изменения уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области, а также расчёту среднемесячных и среднегодовых значений подземного стока, Ю.А. Харанжевской (Харанжевская, 2011; 2013; 2016) по исследованию многолетней изменчивости подземного стока бассейна р. Чая, а также оценки роли подземного стока в формировании современного состояния заболоченной территории южно-таежной подзоны Западной Сибири, О.А. Камневой по многолетним изменениям гидрогеологических условий зоны активного водообмена Среднеобского бассейна (Камнева, 2012) и др.

Большая часть исследуемого района (таежной зоны Западной Сибири) соответствует территории Томской области, для которой характерен плоский рельеф и слабая дренированность. Практически весь сток речных вод с территории области совершается по реке Обь. Реки лесной зоны извилисты, с малыми уклонами и со

слабовыраженными водоразделами. Правые склоны берегов более крутые, чем левые, и значительно рассечены долинами притоков с заболоченными тальвегами.

Особенности климата равнинно-таежной зоны, с продолжительной и снежной зимой, определяют основные черты распределения стока рек. Зимний сток (XI-III) равнинных рек (Улу-Юл, Кеть, Тым, Чая, Васюган, Четь и др.) составляет 13%, весенний – (IV-V) 56 %, летне-осенний – 31 % годового стока (Гидрогеология СССР, 1970). Количество атмосферных осадков на территории исследования выше биологической потребности леса в воде. Вследствие чего лес обуславливает наиболее выгодное для меженного и зимнего питания рек распределение влаги между поверхностным и подземным стоком, увеличивая долю грунтового стока за счет поверхностного (Ресурсы пресных..., 1991). Характерной особенностью данной территории является широкое распространение болот, поскольку природные условия для этого благоприятны: избыточное увлажнение, слабый дренаж, плоский рельеф, слоистость грунтов и др. (Евсеева, 2001).

В структурно-геологическом отношении территория района приурочена к внутренней области Западно-Сибирской плиты. Согласно гидрогеологическому районированию, территория исследования расположена в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна. В разрезе мезозойско-кайнозойских отложений, в свою очередь, выделяются два гидрогеологических этажа с резко различными условиями формирования подземных вод, разделенные мощным региональным водоупором верхнемелового-палеогенового возраста.

Основным объектом исследования являются подземные воды верхнего гидрогеологического этажа Западно-Сибирского артезианского бассейна (ЗСАБ), приуроченные к водоносным отложениям неоген-четвертичного и палеогенового возраста и широко распространённые в таёжной зоне Западной Сибири, в том числе и на территории Томской области. Частично использованы данные по подземным водам меловых отложений. Главное внимание было уделено изучению подземных вод, представленных практически повсеместно на территории Томской области, где имеется стабильно функционирующая с 1960-х гг. сеть режимных гидрогеологических наблюдений. К режимным скважинам, характеризующим режим подземных вод верхнего гидрогеологического этажа ЗСАБ относятся скважины 123р, 124р, 156р, 157р, 167р, 169р, 284р, 94р, 80р, 113р, 114р, 118р, 92р, для подземных вод меловых отложений были использованы материалы наблюдений на режимных скважинах 79р и 115р (Рис. 1). В целом, выбор пунктов наблюдений осуществлялся с учётом отсутствия явно выраженного антропогенного воздействия на подземные воды и продолжительности рядов за уровнями. Часть скважин вскрывает грунтовые воды, для которых характерно весенне-осеннее питание при инфильтрации талых и дождевых вод и террасовый вид режима. Данные по одной скважине (92р) характеризуют междуречный вид режима грунтовых вод, а остальные скважины вскрывают напорные воды весенне-осеннего питания.

На сегодняшний день существует проблема оценки современного подземного стока, которая неоднократно рассматривалась в опубликованных работах (Боревский и др., 2014; Гриневский, 2012; Куделин, 1960; Кусковский, 1966; Попов, 1968; Mei, 2015; Miller et al. 2015). Обычно используется метод расчленения гидрографа при допущении равенства подземного стока и подземной составляющей речного стока, причём в предположении преобладания подпорного режима взаимодействия речных и

подземных вод. Однако в долинах равнинных рек Западной Сибири даже с сильно заболоченными водосборами в ряде случаев наблюдается нисходящий режим.

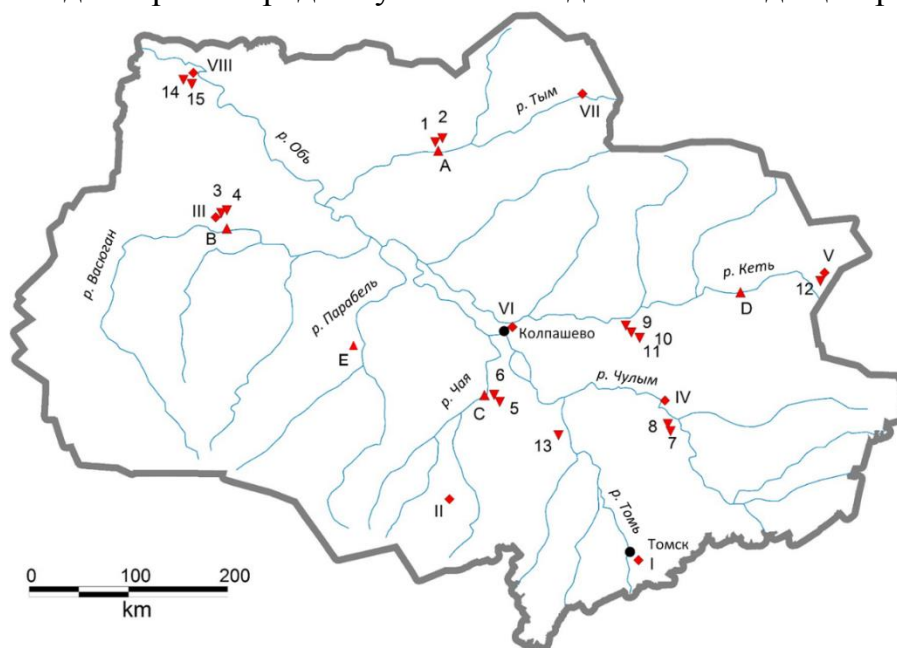


Рисунок – 1. Схема размещения пунктов наблюдений; условные обозначения: 1–15 – пункты гидрогеологических наблюдений; I–VIII – метеорологические станции Росгидромета; А–Е – гидрологические посты Росгидромета

Поэтому, прежде чем непосредственно перейти к оценке подземного стока автором были изучены и проанализированы изменения уровней подземных вод в пунктах наблюдения вблизи средних рек территории исследования (рр. Васюган, Парабель, Чая, Тым, Кеть). В результате анализа внутригодового изменения уровней подземных вод установлено, что минимальные значения наблюдаются преимущественно в холодный период с ноября по март, а их увеличение происходит в весенний период и совпадает с периодом половодья рек (рис.2 а-б).

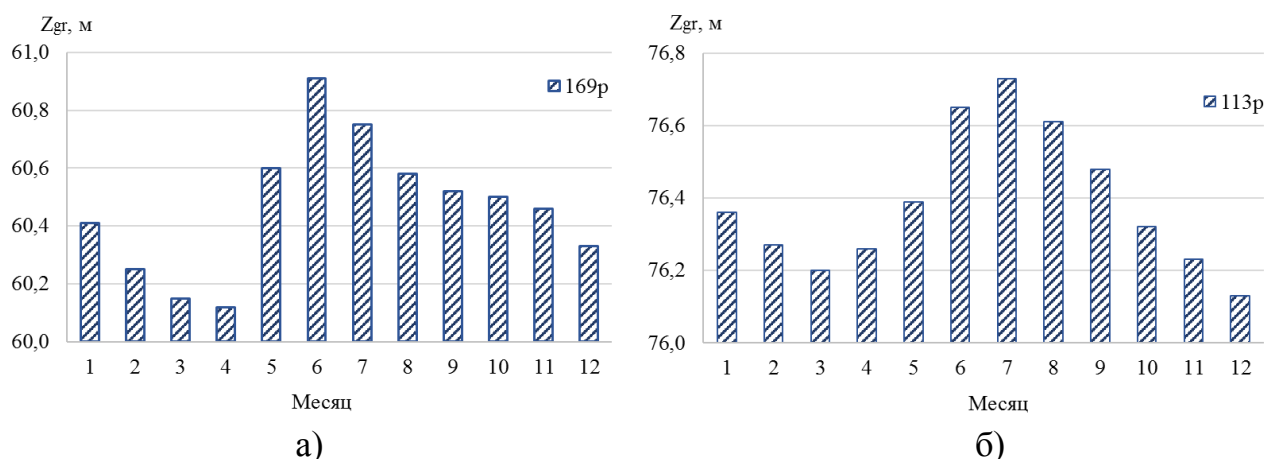


Рисунок – 2. Внутригодовое изменение уровней подземных вод в скважинах а) – 169р с. Средний Васюган; б) – 113р с. Белый Яр

При сравнении уровней речных и грунтовых вод рек Тым, Кеть, Чая, Васюган, выявлен нисходящий режим подземного стока, что подтверждается в целом синхронным изменением уровней (рис.3 а-б).

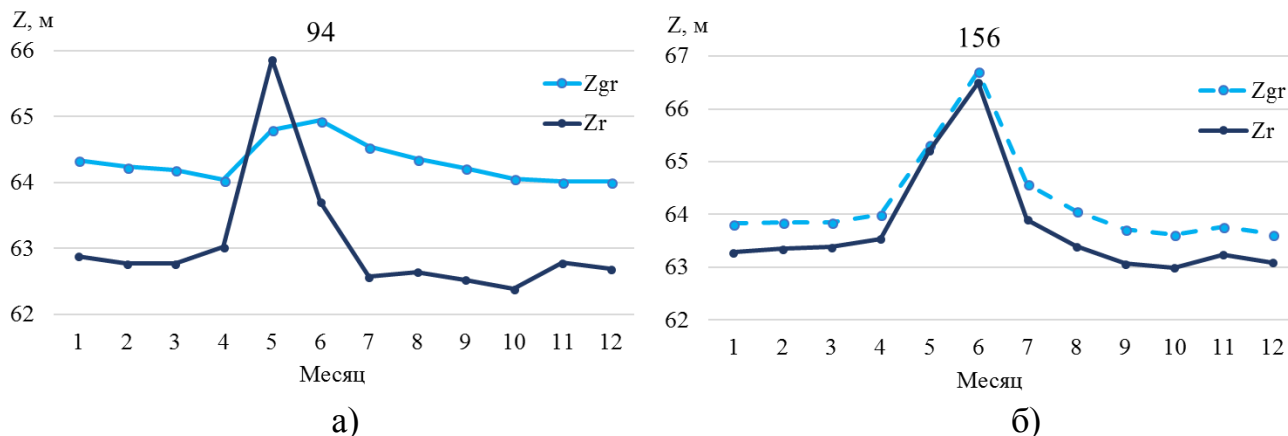


Рисунок – 3. Совмещенный график уровней подземных и речных вод: а) – скв. 94р и р. Чая (с. Подгорное); б) – скв. 156р и р. Тым (с. Напас).

В связи с этим в работе проводится оценка подземного стока по методике, предложенной О. Г. Савичевым (Савичев, 2004,) основанной на регрессионной зависимости уровней речных и подземных вод, аналогичной по структуре уравнению Дюпюи:

$$Q_{gr(Z),i} = a_0 + a_1 \cdot Z_{gr,i} + a_2 \cdot (Z_{gr,i}^2 - Z_{r,i}^2), \quad (1)$$

где $Q_{gr(Z)}$ – расход подземных вод в i -месяц, $\text{м}^3/\text{с}$; Z_{gr} и Z_r – уровни подземных и речных вод в i -месяц, м; a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты регрессии.

Использование уравнения (1) предполагает, что во-первых, водный сток незарегулированных рек в период зимней межени при отсутствии некомпенсируемых объемов сбросов и забора природных вод в целом эквивалентен подземному стоку с водосборной территории и, во-вторых, зависимости между уровнями подземных вод и подземным стоком, найденные для зимней межени, в целом сохраняются в течение всего года. Коэффициенты регрессии оцениваются методом наименьших квадратов (МНК) по данным за период зимней межени (с декабря по март) о среднемесячных уровнях подземных вод, полученных на режимных скважинах государственной наблюдательной сети (Савичев, 2004, 2005, 2010, 2011), среднемесячных уровнях воды в средних реках, в водосборах которых расположены принятые к расчетам гидрогеологические скважины.

Кроме того, величина подземного стока может определяться как сумма среднемесячных значений подземного водного стока $Q_{gr(li)}$, которые с декабря по март принимаются равными среднемесячному водному стоку рек, а в прочие месяцы - вычисляются линейной интерполяцией по формуле:

$$Q_{gr(li)} = \begin{cases} Q_{r,12} + (Q_{r,12} - Q_{r,3}) \cdot (i - 3) / 9; & i = 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 \\ Q_{r,i}; & i = 1, 2, 3, 12 \end{cases}, \quad (2)$$

где $Q_{gr(li)}$ – расход подземных вод в i -месяц календарного года; Q_r – расход воды в реке в i -месяц.

Принимая это во внимание, было проведено сопоставление значений подземного стока в водосборах рек Васюган, Парабель, Чая, Тым, Кеть, полученных по уравнению (1) и данных, полученных в результате линейной интерполяции между расходами воды в зимнюю межень по формуле (2). В результате установлено, что соотношение $Q_{gr(Z)}/Q_{gr(li)}$ изменяется в диапазоне от 1,02 до 1,85 (табл. 1), что позволяет использовать уравнение (2) для оценки минимального (базового) подземного стока.

Таблица 1. – Оценка подземного стока и параметры расчётных уравнений (1) и (2) (Моисеева, Савичев, 2017)

Река – створ	Номер скважины (возраст отложений)	$Q_{gr(li)}$, м ³ /с	$Q_{gr(z)}$, м ³ /с	$Q_{gr(z)}/Q_{gr(li)}$	Коэффициенты регрессии (1) и погрешности их определения			R^2
					$a_0 \pm \delta_a$	$a_1 \pm \delta_a$	$a_2 \pm \delta_a$	
р. Васюган – с. Средний Васюган	169p ($Q_{птб} + 2Q_{штб}$)	44,3	82,0	1,85	–	$4,80 \pm 0,82$	$-0,37 \pm 0,08$	0,44
р. Парабель – с. Новиково	129p (P_{3lg})	23,1	39,7	1,72	$-3123,60 \pm 196,68$	$43,87 \pm 2,43$	$-0,17 \pm 0,02$	0,93
р. Чая – с. Подгорное	94p (Q_{III})	41,4	42,3	1,02	–	$0,10 \pm 0,04$	$0,10 \pm 0,01$	0,38
р. Тым – с. Напас	156p ($aQ_{птб} + P_{3lt} + P_{3nm}$)	67,2	102,7	1,53	$-6021,27 \pm 1258,39$	$94,41 \pm 19,56$	$1,00 \pm 0,39$	0,53
р. Кеть – п. Максимкин Яр	113p ($2aQ_{птб} + aQ_{штб} + N_1$)	98,3	152,8	1,55	–	$68,90 \pm 20,99$	$-0,45 \pm 0,10$	0,45

Примечание: $Q_{gr(z)}$ – расход подземных вод, рассчитанный по зависимости (1); $Q_{gr(li)}$ – расход подземных вод, рассчитанный по зависимости (2); R^2 – квадрат корреляционного отношения для уравнения (1); привodka выборочных средних к среднемноголетним значениям проводилась путём умножения на соотношение (Q_p/Q_n), где Q_p – выборочное среднее значение суммарного стока; Q_n – среднее многолетнее значение суммарного стока по (Савичев, 2010).

Величина квадрата корреляционного отношения R^2 между измеренными (в зимний период) и вычисленными по уравнению (2) значениями во всех случаях были выше критического значения 0,36, что свидетельствует о возможности использования данного способа оценки подземного стока в качестве базового.

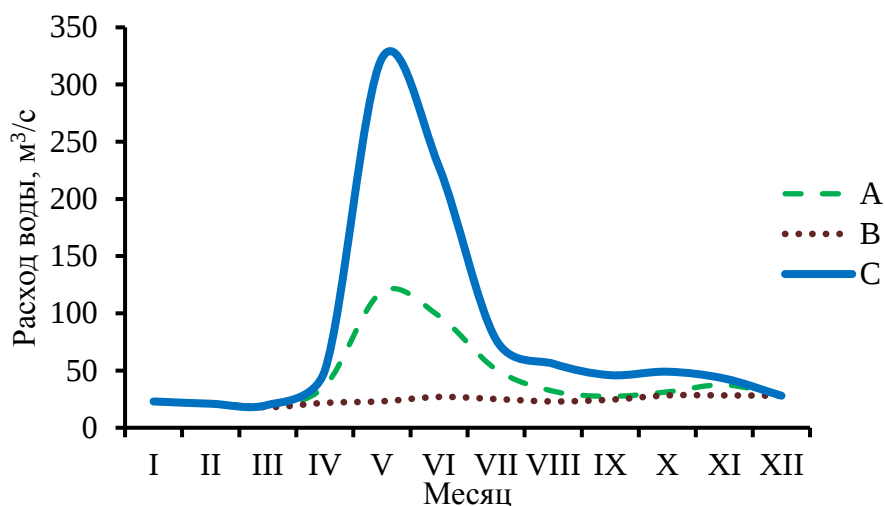


Рисунок – 4. Гидрограф реки Парабель в створе с. Новиково; условные обозначения: А – расход подземных вод по (1); В – расход подземных вод по (2); С – суммарный расход воды (Моисеева, Савичев, 2017)

На основе изученной литературы, содержащей информацию о количественной оценке подземного стока и расчетных значений, полученных по уравнениям (1, 2) для территории исследования была составлена таблица 2.

Вычисленные с помощью уравнений (1, 2) значения модуля стока согласуются с данными, представленными в литературных источниках, что, с одной стороны, свидетельствует о сопоставимости используемых методик расчета, а с другой, полученные автором материалы основаны на использовании современных данных

наблюдений, что позволяет использовать полученные результаты в качестве наиболее актуальной оценки. На основе полученных данных построена схема изолиний изменения модуля подземного стока средних рек с использованием топографической карты территории исследования (Рис. 5).

Таблица 2 – Значения подземного стока на территории Томской области согласно литературным источникам и рассчитанным данным

Источник данных	Значения подземного стока для территории Томской области, л/(с км ²)
(Подземный сток..., 1966)	1-2
(Всеволожский, 1973)	1-3
(Ресурсы пресных..., 1991)	0,5-3
(Вода России..., 2000)	2-3
(Зекцер, 2012)	2-3
(Карты ресурсного..., 2010)	1-3
По уравнению 1	2,2-4,2
По уравнению 2	1-3,2

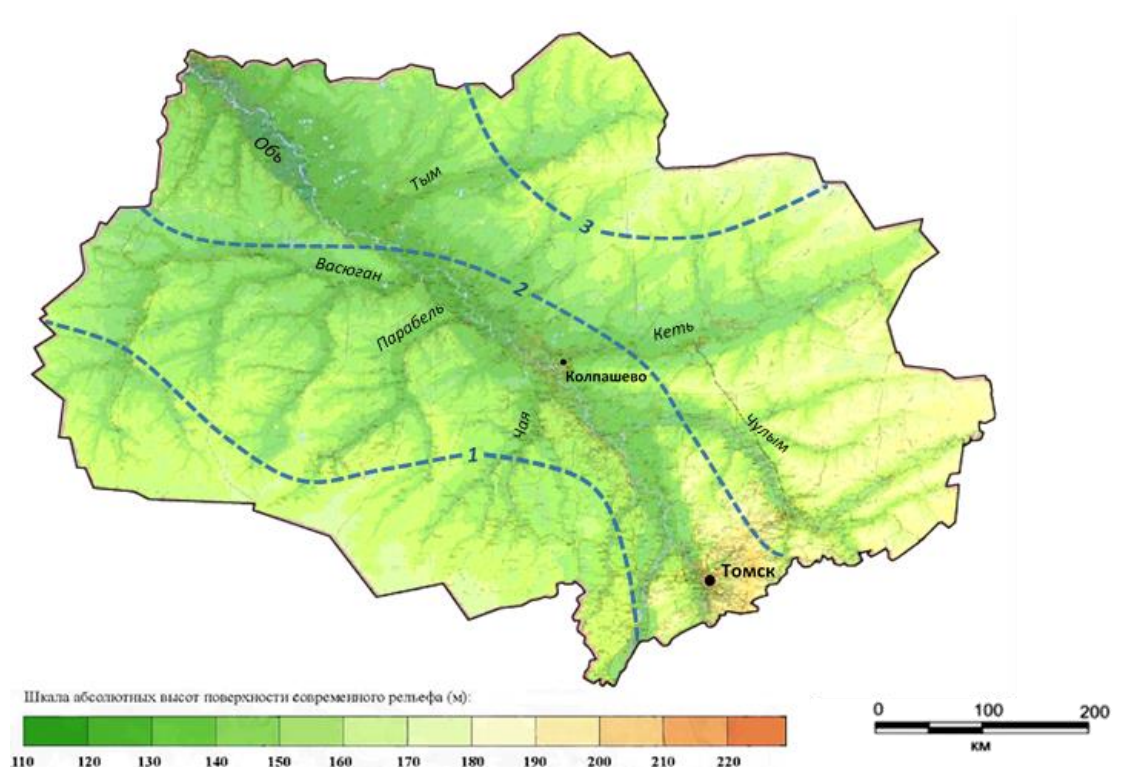


Рисунок – 5. Модуль подземного стока средних рек Томской области, л/(с·км²)

В заключении можно сказать, что модуль подземного стока на территории таежной зоны Западной Сибири изменяется от 1 до 3,2 л/(с·км²). В пространственном отношении подземный сток отражает региональные закономерности распределения широтной зональности и увеличивается по направлению с юго-запада на северо-восток. При этом подземный сток правобережной части р. Обь характеризуется более высокими величинами 2,1-3,2 л/(с·км²), а левобережной части составляет 1-1,5 л/(с·км²).

Для более детального изучения изменений подземного стока, в работе проведен статистический анализ многолетних изменений среднегодовых уровней подземных вод в таёжной зоне Западной Сибири.

Ранее выполненные исследования изменений уровней подземных вод на территории Томской области (Льготин и др., 2010; Shiklomanov et al., 2013, Савичев, Макушин, 2004) (по данным режимных скважин у сёл Напас (157р), Средний Васюган (169р), Подгорное (94р), Зырянское (81р), Белый Яр (114р), Мельниково (63р)) за период с начала наблюдений до 2005 г. позволили выявить нарушение однородности рядов среднегодовых и/или среднесезонных уровней подземных вод, связанное в основном с повышением уровней подземных вод с середины 1980-х гг. по 2005 г. (по сравнению с предыдущим периодом) в среднем на 0,21 м (Льготин и др., 2010; Савичев, Макушин, 2004; Камнева, 2012). Наибольшее увеличение отмечено в зимний период (в среднем на 0,23 м), наименьшее – в летне-осенний (0,09 м). Кроме того, было выявлено неслучайное увеличение среднегодовых и среднесезонных уровней подземных вод (за весь период наблюдений) у сёл Подгорное (94р), Напас (157р), Зырянское (81р), Мельниково (63р). Согласно работе (Савичев, Макушин, 2004), с 1980 по 2003 среднемесячные уровни подземных вод зоны активного водообмена вне участков явного антропогенного влияния повысились по сравнению с 1960–1970 гг. в среднем на 0,1–0,4 %, причем наиболее устойчивый рост характерен для зимнего сезона и начала весеннего половодья, пик которого на рассматриваемой территории приходится на конец мая-июнь.

Результаты выполненного автором анализа данных наблюдений за период с 1965–1973 гг. до 2010–2015 гг., в целом подтвердили указанные выше выводы. В частности, отмечено дальнейшее увеличение уровней подземных вод, которое в среднем составляет 0,34 м, в том числе 0,32 м для подземных вод четвертичных отложений (7 скважин), 0,35 м для отложений палеогена (6 скважин) и 0,37 м для меловых отложений (2 скважины). Нарушение однородности рядов среднегодовых значений уровней подземных вод зафиксировано в 73 % случаях (скв. 156р, 157р, 167р, 284р, 94р, 79р, 80р, 113р, 114р, 118р, 92р). Неслучайное изменение среднегодовых уровней подземных вод за весь период наблюдений выявлено на 8 скважинах из 15 (157р, 167р, 284р, 94р, 79р, 80р, 114р, 92р). Максимальное увеличение уровней вод характерно для четвертичных отложений у с. Кривошеино на границе водосбора и долины р. Оби (скважина 92р, глубина скважины 24 м). Существенное увеличение уровней подземных вод (0,3–0,9 м/год) также отмечено в скважинах, вскрывающих воды четвертичных, палеогеновых и меловых отложений в водосборах рек Чая (с. Подгорное, скв. 94р, 284р) и Чулым (с. Зырянское, скв. 79р, 80р), причём наиболее заметный рост уровней подземных вод происходит в период после 1995 г. (табл. 3).

Таблица 3. Результаты статистического анализа среднегодовых значений уровней подземных вод

№ (Рис.1)	Скважина (возраст отложений)	Период	A, м	σ , м	$S/S_{5\%}$	$F/F_{5\%}$	$\pi/\pi_{5\%}$	k_1 , м/год
1	156р (Р ₃)	1971–1994	64,51	0,43	–	–	-0,32	–
		1995–2010	64,53	0,25	–	–	-0,15	–
		1971–2010	64,52	0,36	0,07	1,04	-0,15	–
2	157р (Р _{1pr})	1971–1994	76,83	0,08	–	–	0,99	–
		1995–2010	76,98	0,06	–	–	0,14	–
		1971–2010	76,89	0,10	3,19	0,63	3,01	0,007
3	167р (Р _{2tv})	1972–1994	60,77	0,21	–	–	1,29	0,017
		1995–2015	61,07	0,13	–	–	0,58	–
		1972–2015	60,92	0,23	2,76	1,07	3,14	0,013

Продолжение таблицы 3.

№ (Рис.1)	Скважина (возраст отложений)	Период	A, м	σ , м	S/S _{5%}	F/F _{5%}	$\pi/\pi_{5\%}$	k ₁ , м/год
4	169p (aQ _{ntb})	1972–1994	59,95	0,25	–	–	-0,85	–
		1995–2010	60,08	0,40	–	–	-0,74	–
		1972–2010	60,01	0,33	0,63	0,88	-0,06	–
5	284p (P ₂ +P ₃)	1975–1994	74,88	0,28	–	–	0,05	–
		1995–2010	75,38	0,34	–	–	1,46	0,051
		1975–2010	75,10	0,40	2,32	0,59	2,28	0,025
6	94p (N ₁)	1965–1994	64,17	0,61	–	–	1,02	0,029
		1995–2015	64,86	0,40	–	–	1,22	0,036
		1965–2015	64,45	0,63	2,24	1,00	2,69	0,028
7	79p (K ₂)	1965–1994	100,16	0,25	–	–	0,50	–
		1995–2015	100,89	0,62	–	–	0,74	–
		1965–2015	100,46	0,57	2,84	2,81	2,59	0,025
8	80p (P ₃)	1965–1994	99,76	0,26	–	–	0,55	–
		1995–2010	100,56	0,54	–	–	2,65	0,099
		1965–2010	100,04	0,54	3,28	1,85	3,18	0,030
9	113p (N ₁)	1968–1994	76,38	0,34	–	–	-0,89	–
		1995–2012	76,64	0,36	–	–	0,67	–
		1968–2012	76,48	0,37	1,19	0,47	0,66	–
10	114p (P ₃)	1968–1994	76,84	0,30	–	–	-0,40	–
		1995–2010	77,16	0,31	–	–	0,64	–
		1968–2010	76,97	0,34	1,64	0,44	1,16	0,010
11	115p (K ₂)	1968–1994	78,19	0,26	–	–	-0,97	–
		1995–2010	78,35	0,25	–	–	0,74	–
		1968–2010	78,25	0,26	0,99	0,42	0,42	–
12	118p (Q _{ntb})	1968–1994	96,40	0,76	–	–	-0,35	–
		1995–2010	96,58	0,23	–	–	0,30	–
		1968–2010	96,47	0,62	0,45	4,16	0,13	–
13	92p (aQ ₂)	1965–1994	69,96	0,37	–	–	3,23	0,035
		1995–2015	71,08	0,31	–	–	-0,04	–
		1965–2015	70,40	0,70	5,44	0,59	5,66	0,039
14	123p (1Q _{III})	1968–1994	39,00	0,56	–	–	-1,06	-0,032
		1995–2015	39,01	0,39	–	–	0,15	–
		1968–2015	39,01	0,49	0,03	0,85	-0,42	–
15	124p (1Q _{III})	1970–1994	38,27	0,45	–	–	-1,15	-0,031
		1995–2010	38,37	0,40	–	–	0,05	–
		1970–2010	38,31	0,43	0,34	0,47	-0,25	–

Примечание: A – среднее арифметическое значение, σ – среднее квадратическое отклонение; полужирным шрифтом выделены соотношения фактических и критических значений критериев Стьюдента (S), Фишера (F) и Питмена (π), которые свидетельствуют о возможном нарушении однородности и случайности выборок; k₁ – значение изменений уровней грунтовых вод за период, где выявлен тренд.

Автором также выполнен анализ связей (коэффициентов корреляции r) между колебаниями среднегодовых уровней подземных вод за период с 1973 по 2010 гг. Показано, что между колебаниями среднегодовых значений уровней подземных вод отложений разного возраста прослеживаются статистически значимые корреляционные связи на значительной части исследуемой территории. Наиболее тесная связь отмечена для скважин, вскрывающих неоген-четвертичные, палеогеновые и меловые отложения в Кеть-Чулымском районе в восточной части Томской области, а именно – в средней части водосбора реки Кеть (скважины 113p, 114p, 115p), палеогеновые и меловые

отложения в средней части водосбора реки Чулым (скважины 80р и 79р). Для левобережной равнинной части бассейна Средней Оби (водосборы рек Васюган и Чая, западная часть Томской области) значимые связи между уровнями подземных вод четвертичных и палеогеновых отложений отсутствуют или существенно слабее. В первом случае (для более связанных колебаний уровней подземных вод в Кеть-Чулымском районе) это объясняется лучшей проницаемостью водоносных отложений разного возраста, представленных в значительной мере разнотернистыми песками, с галькой и гравием, а во втором (для водосборов левых притоков реки Обь) – заметно бóльшим распространением суглинков, глин и песков с переслоями глин, которые характеризуются худшими фильтрационными свойствами.

На основе, проведенного автором анализа данных наблюдений за уровнями подземных вод и оценки подземного стока сформулировано первое защищаемое положение.

Второе защищаемое положение

Разработана и обоснована методика реконструкции подземного стока, основанная на зависимости модуля подземного стока от суммы атмосферных осадков за теплый период (величина инфильтрационного питания) и коэффициента стока (степень обводнённости горных пород). На основе данной методики показано, что в последние десятилетия в таёжной зоне Западной Сибири наблюдаются максимальные или близкие к максимальным для голоцена значения подземного стока (24 мм/год).

Реконструкция подземного стока обычно сводится к: 1) поиску регрессионных зависимостей между расходами или уровнями подземных вод (искомой функцией) между температурой приземных слоев атмосферного воздуха, атмосферными осадками, суммой отрицательных или положительных температур атмосферного воздуха, меженными расходами речных вод, индексами солнечной активности и т.д. (значимыми аргументами); 2) генерации рядов аргументов; 3) аппроксимации и/или интерполяции пропусков в данных об уровнях подземных вод по уравнениям регрессии (Ковалевский и др. 1998; Ковалевский, 2006; Коноплянцев, Семенов, 1979).

Однако при использовании указанного подхода возникают вопросы не только с получением достоверной климатической информации, без которой невозможно восстановление уровня режима подземных вод, но и с обоснованием устойчивости связей между гидрогеологическими и иными показателями в долгосрочном разрезе и неоднозначностью понятия о подземном стоке (Боревский, Марков, 2014). Последний вопрос непосредственно сказывается на выборе показателей подземного стока и его факторов. В рассматриваемой работе под подземным стоком понималась его часть, которая может быть количественно оценена как подземная составляющая речного стока. Однако и в этом случае появляется неоднозначность, связанная с неопределенностью оценки подземной составляющей речного стока во время половодий и паводков. Согласно (Куделин, 1972; Кусковский, 1966 и др), для решения этой задачи необходимо предварительно установить характер взаимодействия поверхностных и подземных вод – нисходящий или подпорный. Однако очень часто полагается, что режим – подпорный, а подземный сток в весенний период уменьшается вплоть до нулевых значений, хотя даже в условиях Западно-Сибирской равнины нисходящий режим поддерживается почти всегда, а подпорный наблюдается, преимущественно, в пределах поймы. Но подземный сток не ограничивается поймой

реки и даже ее долиной, а охватывает весь подземный водосбор, который может быть больше, чем поверхностный.

С учетом этого предлагается следующая методика реконструкции подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири.

1. Выполняется оценка месячного подземного стока в современный период (период, охваченный наблюдениями за уровнями подземных вод, уровнями и расходами речных вод) по уравнениям (1) и (2).

2. Проводится анализ основных факторов формирования подземного стока и разработка математической модели его формирования, пригодной для реконструкции подземного стока в условиях ограниченного объема исходной информации. Фактически, анализ факторов является первым этапом итерационного процесса построения модели подземного стока. Корреляционный и регрессионный анализ данных о подземном стоке, полученных по уравнению (2), речном стоке, климатических условиях в речных бассейнах (то есть при допущении тождественности поверхностного и подземного водосборов) позволил получить зависимость годового подземного стока (среднее из среднемесячных расходов воды).

Обычно все формулы движения потока основываются на законе сохранения энергии, при этом нужно учитывать, что для реконструкции подземного стока должна использоваться модель, которая одновременно должна адекватно описывать гидрогеологические условия и основываться на минимуме доступной исходной информации (обычно это – средние за какой-либо период значения температуры атмосферного воздуха и суммы атмосферных осадков, вычисленные косвенно по остаткам растительности, фауны и так далее).

В связи с этим предлагается следующая схема выведения уравнения для оценки подземного стока в голоцене, в основе, которого лежит уравнение Дарси (3),

$$Q_{gr,a} = k_f \cdot m \cdot B \cdot J_{gr}, \quad (3)$$

где $Q_{gr,a}$ – средний расход подземных вод, м³/с; k_f – коэффициент фильтрации, м/сут; m – мощность водоносного горизонта, м; B – ширина потока подземных, м; J_{gr} – уклон подземных вод.

Учитывая, что параметры уравнения (3) могут быть представлены в виде (4-6):

$$m \approx k_1 \cdot L \cdot J_s \cdot \left(\frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2}, \quad (4)$$

$$B \approx \frac{F}{L}, \quad (5)$$

$$\tau \approx \frac{L}{k_3 \cdot J_s} \approx \frac{Z_{gr,b} - Z_{gr,e}}{k_4 \cdot H_{T>0}^{k_5}}. \quad (6)$$

где L – длина реки, м; J_s – средневзвешенный уклон реки; Y_a – средний слой суммарного речного стока, мм; H_a – средний слой атмосферных осадков, мм/год; F – площадь водосбора реки, км²; $H_{T>0}$ – сумма атмосферных осадков за период с положительной температурой атмосферного воздуха, мм/год; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – коэффициенты регрессии; $Z_{gr,b}$ и $Z_{gr,e}$ – уровни подземных вод в начале (в замыкающем створе реки) и конце участка (в истоках реки); τ – время перемещения водных масс на расстояние L при падении уровня подземных вод $\Delta Z_{gr} = Z_{gr,b} - Z_{gr,e}$ ($J_{gr} \approx \Delta Z_{gr}/L$).

Тогда уравнение (3) может быть приведено к виду (7):

$$M_{gr,a} = \frac{Q_{gr,a}}{F} = \frac{k_f \cdot k_1 \cdot k_4}{k_3} \cdot H_{T>0}^{k_5} \cdot \left(\frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2} = k_6 \cdot H_{T>0}^{k_5} \cdot \left(\frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2}, \quad (7)$$

где $M_{gr,a}$ – средний модуль подземного стока; k_6 – коэффициент регрессии.

Оценка суммарного годового стока проводилась по уравнению 8, подробная методика которого изложена в (Савичев и др., 2016).

$$Y_a \approx \mu \cdot H_a \cdot \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \cdot \left(1 + \frac{Cv_H^2 \cdot E_0^2}{2 \cdot H_a^2}\right), \quad (8)$$

Величина E_0 , с учётом уравнения теплового баланса, является функцией радиационного баланса и теплообмена между атмосферой и почвогрунтами, которые, в свою очередь, нелинейно связаны с положительными температурами воздуха (состояние поверхности наиболее активно меняется за счёт растительности, развитие которой в целом ограничено именно положительными температурами воздуха).

Физический смысл уравнения (7) заключается в выделении зависимости модуля подземного стока от инфильтрационного питания и степени обводнённости горных пород. Инфильтрация наблюдается преимущественно в тёплый период года, а степень обводнённости коррелирует с коэффициентом стока Y_a/H_a (определялся с учетом предложенной модели суммарного стока в (Савичев и др., 2016)). Аprobация модели (7) была выполнена по 38 средним рекам Сибири. Соотношение между средними значениями модуля подземного стока, вычисленными по уравнению (2) и модуля подземного стока, рассчитанным по уравнению (7) представлены на рисунке 6 (Савичев и др., 2016).

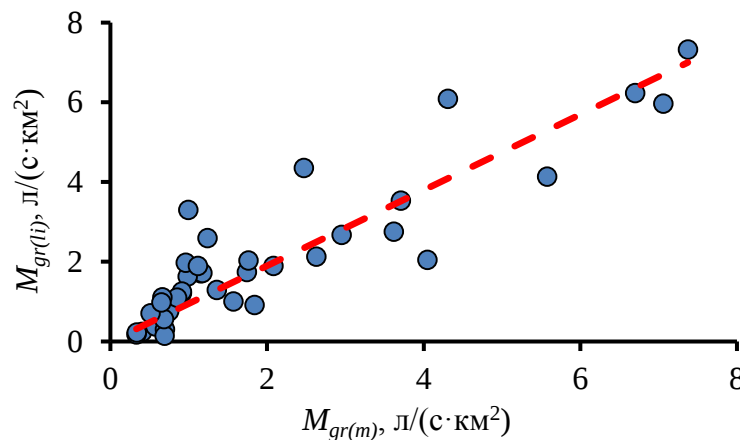


Рисунок – 6. Соотношение между средними значениями модуля подземного стока $M_{gr(li)}$, вычисленными по уравнению (2), и модуля подземного стока $M_{gr(m)}$, рассчитанным по уравнению (7) (Моисеева, Савичев, 2017)

Таким образом, исходная модель, принятая для реконструкции подземного стока, включает в себя данные о модуле подземного стока ($M_{gr,a}$, л/(с·км²)) и суммы атмосферных осадков за тёплый период ($H_{T>0}$, мм/год), Y_a (мм/год), H_a (мм/год). Для данной модели получены коэффициенты регрессии $k_2=1,197\pm0,123$, $k_5=0,268\pm0,025$, $k_6=1$, для которых $R^2=0,76$.

Сумма положительных температур воздуха $\Sigma T_{>0}$, по сути, является характеристикой величины инфильтрации в водоносные горизонты, а коэффициент стока (отношение суммарного речного стока к общему увлажнению) – одновременно характеристикой влагозапасов в водосборном бассейне и условий стока.

3. Выполняется сбор и анализ исходной климатической информации, необходимой для использования модели (3–9). В рассматриваемой работе были использованы результаты палеоклиматических реконструкций, выполненных рядом ученых, такими как Р. Ya. Groisman, G. Gutman, K. Gajewski, P. Moller, A. B. Ахтерьякова, С. В. Лещинский, А. М. Малолетко, Н. Н. Пологова, Е. Д. Лапшина, и справочные материалы. По данным (Научно-прикладной..., 1993, 1998; СНиП 23-01-99*; Groisman et al., 2013; Gajewski; Moller et al., 2015; Climate Change..., 2014) были приняты оценки температуры приземных слоев атмосферного воздуха и годовых атмосферных осадков в водосборах рек Чузик и Турухан для периодов 8650 и 9550 тыс. лет назад. Выбор водосборов обусловлен, с одной стороны, наличием наиболее достоверных палеоклиматических реконструкций, а с другой стороны – представительностью этих водосборов. Водосбор реки Чузик расположен в южно-таежной подзоне, водосбор реки Турухан – на границе лесотундры и северной тайги. В разные периоды голоцена происходило смещение границ природных зон. Поэтому анализ подземного стока в указанных водосборах позволяет лучше понять механизмы его изменений в последние 9-11 тыс. лет.

Основным источником палеоклиматической информации послужила монография (Groisman et al., 2013), где приведено подробное описание изменений климата в голоцене, выполненного на основе полученных рядом ученых данных анализа пыльцы, торфяных и озерных отложений, сопровождаемые радиоуглеродным датированием. В работе производится разбивка голоцена на периоды близко к стандартным определениям (Хотинский, 1977), но с небольшой региональной спецификой для Сибири. Исследования, выполненные Н. А. Хотинским, показывают, что общая тенденция в изменении климатических показателей последнего отрезка четвертичного периода наиболее чётко проявилась на четырёх рубежах: поздне-последледниковом (около 10300 лет назад), когда глубокая температурная депрессия последнего оледенения сменилась повсеместным потеплением и смягчением континентальности, бореально-атлантическом (8000 лет назад), синхронном с новосанчуговским похолоданием, атлантическо-суббореальном рубеже (около 4500 лет назад) и в последней трети суббореального периода, когда климат снова начал меняться в сторону похолодания (Хотинский, 1977).

4. По уравнениям (7, 8) и данным о сумме положительных температур воздуха $\Sigma T > 0$ и суммы атмосферных осадков за тёплый период рассчитывается суммарный сток рек и его подземная составляющая.

Сумма среднемесячных положительных температур воздуха $\Sigma T > 0$ и сумма атмосферных осадков за тёплый период определялись по региональным зависимостям, полученные по данным 64 метеостанций на равнинной части Западной Сибири (Савичев и др., 2016). Принятые климатические и морфометрические характеристики и результаты расчёта суммарного стока рек Чузик и Турухан и их подземной составляющей приведены в таблице 4.

Анализ полученных результатов показал, что в лесотундре и южной тайге Западной Сибири наблюдаются несовпадающие по направлению и абсолютным значениям изменения элементов водного баланса, включая и подземный сток. Односторонних изменений суммарного и подземного стока за последние 8000 – 10000 лет не обнаружено, хотя нельзя не отметить тенденцию увеличения за последние 500 лет суммарного и подземного стока в водосборе реки Турухан в северо-западной части Западно-Сибирской равнины. За тот же период в южно-таёжной подзоне

(водосбор реки Чузик) при общем потеплении климата определённый рост суммарного и подземного стока наблюдается только в последние 50–60 лет (табл. 3). Подземная составляющая суммарного стока реки Чузик изменяется от 18 до 21 %, реки Турухан – от 21 до 25 % (Рис. 7).

Таблица 4. Результаты реконструкции суммарного и подземного стока с территорий, соответствующих водосборам рек Чузик и Турухан

Река – створ	Расчётный год	T_a , °C	H_a , мм/год	$H(T>0)$ мм/год	f_F , %	f_M , %	Y_a , мм/год	Y_{gr} , мм/год	Y/H
р. Чузик (с. Осипово)	–8650	–4,7	548	334	0	0	67	12	0,12
	–7550	–3,0	548	348	10	0	113	23	0,21
	–6550	2,3	455	338	16	4	42	9	0,09
	–4250	0,1	538	369	30	12	83	16	0,15
	–1500	–3,0	548	348	47	22	121	25	0,22
	1960	–1,5	564	370	64	35	117	23	0,21
	2000	–1,2	578	380	68	35	122	24	0,21
р. Турухан (п. Янов Стан)	–9350	–7,4	449	265	0		69	15	0,15
	–8650	–11,2	382	211			70	17	0,18
	–6550	–4,2	607	369	11	1	181	36	0,30
	–4250	–6,5	520	306	38		225	54	0,43
	–1500	–5,5	486	296	9		124	28	0,25
	1960	–8,3	610	336	37		331	72	0,54
	2000	–7,7	634	352	38		343	73	0,54

Примечание: T_a – средняя температура атмосферного воздуха; H_a – средняя сумма атмосферных осадков за год; $H_{T>0}$ – сумма атмосферных осадков за период с положительной температурой атмосферного воздуха; f_F и f_M – лесистость и заболоченность водосборной территории; Y_a – средний слой суммарного речного стока; $Y_{gr,a}$ – средний слой подземного стока.

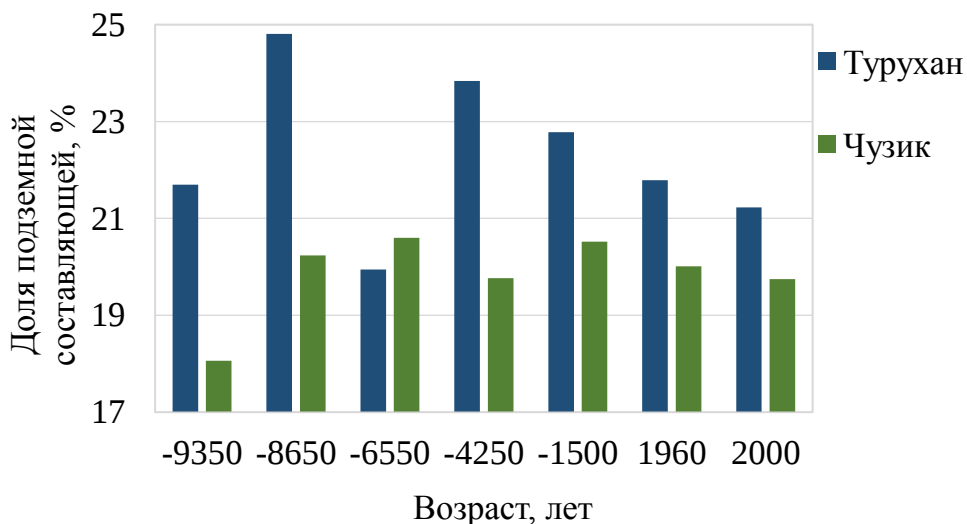


Рисунок – 7. Изменения доли подземного стока на территории водосборов рек Чузик (в створе с. Осипово) и Турухан (в створе п. Янов Стан)

На основе зависимости годового подземного стока от суммы атмосферных осадков за тёплый период и коэффициента суммарного стока предложена методика реконструкции и собственно реконструкция подземного стока на двух типовых участках – водосборах рек Чузик и Турухан. Анализ полученных результатов показал, что в последние десятилетия наблюдаются наибольшие для голоцена (или близкие к наибольшим) значения подземного стока: 73 мм/год в водосборе реки Турухан; 24 мм/год в водосборе реки Чузик (максимум – 25 мм/год 1,5 тысячи лет до нашей эры).

Минимальное значение годового подземного стока в северо-восточной части Западной Сибири (15–17 мм/год) наблюдалось примерно 10-11 тыс. лет назад, а в южной части современной таёжной зоны (9 мм/год) – примерно 8,5 тыс. лет назад.

Таким образом, на основании полученных результатов, включая анализ условий изменения уровней подземных вод сформулировано второе защищаемое положение.

Третье защищаемое положение

Основным условием увеличения подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири является рост атмосферного увлажнения при различных сценариях изменения температуры воздуха. К концу XXI века при сценарии увеличения температуры воздуха и атмосферного увлажнения увеличение подземного стока будет незначительным.

Долгосрочные гидрогеологические прогнозы, особенно в условиях сильной заболоченности региона и развития нефтегазового комплекса в Западной Сибири, имеют очень важное научное и прикладное значение. С учетом этого на основе модели (7-11) был выполнен прогноз возможных изменений подземного стока по предложенным сценариям изменения климатических параметров: I – увеличение средней температуры воздуха на $0,3^{\circ}\text{C}$ и атмосферных осадков на 14 мм/год; II – увеличение средней температуры воздуха на $0,3^{\circ}\text{C}$ и постоянное атмосферное увлажнение; III – постоянная температура воздуха и увеличение атмосферных осадков на 14 мм/год; IV – уменьшение температуры воздуха на $0,3^{\circ}\text{C}$ и увеличение атмосферного увлажнения на 14 мм/год; V – уменьшение средней температуры воздуха на $0,3^{\circ}\text{C}$ и атмосферных осадков на 14 мм/год.

По результатам расчётов сделан вывод о том, что, во-первых, увеличение подземного стока возможно будет происходить при первом, третьем и четвёртом сценариях изменений климата, причём как при потеплении, так и при похолодании. Основным условием увеличения подземного стока является рост атмосферного увлажнения, в том числе и за тёплый период.

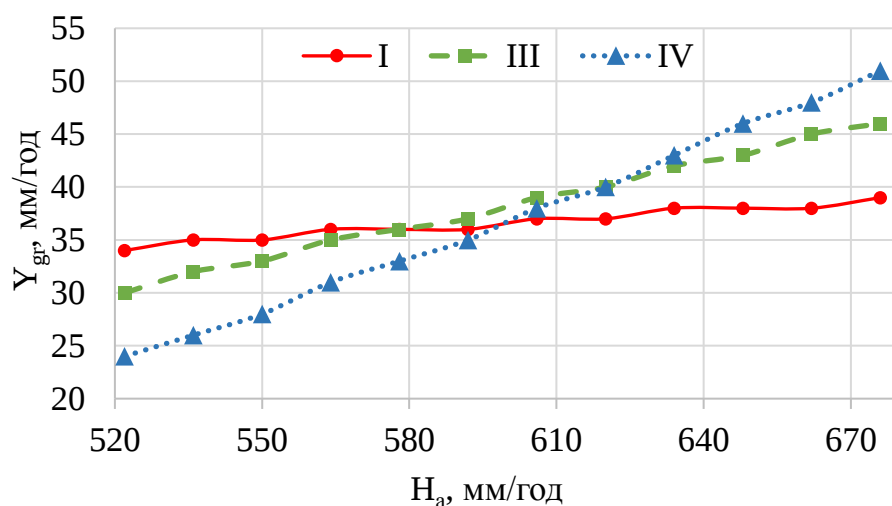


Рисунок – 8. Вероятные изменения подземного (Y_{gr}) стока реки Чузик при различных сценариях изменения температуры атмосферного воздуха (T_a) и атмосферного увлажнения (H_a)

Во-вторых, уменьшение подземного стока вероятно не только при похолодании и аридизации, но и при потеплении, если атмосферное увлажнение существенно не изменится, но возрастет испарение. В-третьих, доля подземной составляющей в

суммарном стоке возрастает только при сценарии одновременного уменьшения температуры воздуха и атмосферных осадков, а при остальных сценариях падает или за счёт общего снижения стока, или вследствие более быстрого роста поверхностной составляющей.

Результаты, представленные в рисунке 8, получены вследствие имитационного моделирования, поэтому делать выводы о конкретных прогнозных значениях суммарного и подземного стока не корректно. В связи с этим, в работе предлагается провести моделирование по данным, представленных в докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Согласно перспективным оценкам МГЭИК, повышение средней глобальной приземной температуры к концу XXI века (2081–2100 гг.) по сравнению с периодом 1986–2005 гг. составит, 0,3–1,7 °С по первому сценарию, 1,1–2,6 °С и 1,4–3,1 °С по промежуточным сценариям и 2,6–4,8 °С по последнему сценарию. Изменения количества осадков не будет однородным. Согласно жесткому сценарию в высоких широтах и экваториальной части Тихого океана будет иметь место, вероятно, увеличение среднегодового количества осадков, во многих засушливых регионах в средних широтах и в субтропиках среднее количество осадков, вероятно, уменьшится, в то время как во многих влажных регионах в средних широтах оно, вероятно, возрастет. Для территории исследования, согласно приведенным прогнозным картам, в докладе МГЭИК к 2081–2100 гг. по первому сценарию (I) температура воздуха увеличится на 1,5°С, количество атмосферных осадков увеличится на 10 %, а по второму сценарию (II) увеличения произойдут на 3°С и 20%, соответственно.

На основе имеющейся математической модели выполнен прогноз изменения суммарного и подземного стока в связи с изменениями температуры и суммы атмосферных осадков по двум сценариям (табл. 5). Прогноз изменений проводился от среднего за период с 1965 по 2015 гг. для территории исследования.

Таблица 5. Результаты прогнозных изменений суммарного и подземного стока к 2081–2100 гг. по двум сценариям (I и II)

Река-Пункт	Сценарии изменения			Прогнозные изменения			
	Вариант	T_a , °С	H_a , мм/год	E_a , мм/год	Y_a , мм/год	Y_{gr} , мм/год	Y_{gr}/Y_a , %
<i>р. Тым-с.Напас</i>	1965-2015	-2	585	464	134	26,5	21
	I	-0,5	644	499	145	26,8	23
	II	2,0	702	558	144	24,8	21
<i>р. Кеть-с.Усть-Озерное</i>	1965-2015	-1,4	535	430	105	21,7	20
	I	0,1	589	475	114	22,0	19
	II	1,6	642	519	123	22,3	19
<i>р. Чая-с.Подгорное</i>	1965-2015	-0,1	478	407	71	15,3	15
	I	1,4	526	448	78	15,7	15
	II	2,9	574	488	86	16,4	15
<i>р. Васюган-с.Ср.Васюган</i>	1965-2015	-0,4	504	442	104	21,1	19
	I	1,1	554	488	113	21,5	19
	II	2,6	605	532	123	22,1	19
<i>р. Парабель-с.Пудино</i>	1965-2015	-0,8	546	421	83	17,5	17
	I	0,7	601	463	91	17,9	16
	II	2,2	655	505	100	18,5	16

В результате, проведенного моделирования получено, что на территории исследования с ростом температуры и количества атмосферных осадков суммарный сток увеличится в среднем на 9 мм/год для первого сценария и 16 мм/год для второго, и менее значительное произойдет увеличение подземного стока для обоих сценариев, в среднем на 5%.

С учётом выявленных тенденций можно предположить, что с ростом температуры воздуха будет происходить дальнейшее увеличение уровней подземных вод вследствие внутригодового перераспределения атмосферного увлажнения, в результате которого наблюдается некоторое увеличение эффективного увлажнения в зимний и весенний периоды и уменьшение летом. В любом случае, указанные тенденции непосредственно не связаны с антропогенным влиянием, например, добычей подземных вод и углеводородов, осушением болот, лесомелиорацией, вырубкой лесов и т.д. Их воздействие на подземные воды в пределах Томской области в настоящее время может быть охарактеризовано в основном как локальное.

На основе результатов реконструкции подземного стока и долгосрочного прогноза изменений элементов водного баланса было сформулировано третье защищаемое положение.

Заключение

На основе данных исследований, выполненных в 2015–2017 гг., сделаны следующие выводы.

1. Модуль подземного стока на территории таёжной зоны Западной Сибири в настоящее время изменяется от 1 до 3,2 л/(с·км²). На протяжении последних 40 лет в таёжной зоне Западной Сибири продолжается рост среднегодовых уровней подземных вод в ненарушенных хозяйственной деятельностью условиях, который в среднем по таёжной зоне Западной Сибири за период с конца 1960-х по 2015 гг. составляет 0,34 м.

2. Разработана и обоснована методика реконструкции подземного стока, основанная на зависимости модуля подземного стока от суммы атмосферных осадков за тёплый период (величина инфильтрационного питания) и коэффициента стока (степень обводнённости горных пород). На основе данной методики показано, что в последние десятилетия в таёжной зоне Западной Сибири наблюдаются максимальные или близкие к максимальным для голоцена значения подземного стока (24 мм/год).

3. Основным условием увеличения подземного стока в таёжной зоне Западной Сибири является рост атмосферного увлажнения при различных сценариях изменения температуры воздуха. К концу XXI века при сценарии увеличения температуры воздуха и атмосферного увлажнения увеличение подземного стока будет незначительным.

Роль хозяйственной деятельности в выявленных закономерностях в явном виде не прослеживается, что, впрочем, не исключает косвенного влияния на изменения климатических характеристик, что, например, утверждается в работах Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Нельзя исключать и наличие региональных или более масштабных факторов изменения водного баланса, вследствие чего, например, возможно увеличение уровней не только подземных вод в пределах Западно-Сибирской равнины, но и уровней Каспийского моря. Косвенным подтверждением этого предположения являются данные приведенные в работах Савичева О.Г., Лыготина В.А., Камневой О.А. об одновременном увеличении уровней подземных вод в таёжной зоне бассейна реки Обь и уменьшении – в предгорных районах Алтая, расположенных в верхнем течении реки Обь.

Разработанная методика и полученные результаты по реконструкции подземного стока позволят в дальнейшем продолжить исследования в построении теории формирования геохимических аномалий и поисков гидрогенных месторождений полезных ископаемых.

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

1. Решетько, М.В. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири / М.В. Решетько, **Ю.А. Моисеева** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 108–118
2. Савичев, О.Г. Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири в голоцене / О.Г. Савичев, М.В. Решетько, **Ю.А. Моисеева** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 5. 87–96.
3. **Моисеева, Ю.А.** Способ расчета и возможные изменения подземного стока в Западной Сибири в голоцене / Ю.А. Моисеева, О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т.328. № 2. 6–14.
4. Савичев, О.Г. Устойчивость поверхностных вод тундры и лесотундры Западной Сибири к антропогенному влиянию / О.Г. Савичев, **Ю.А. Моисеева** // Вестник САФУ. Сер.: Естеств. науки. – 2016. – № 4, С. 36–46. doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.4.36

Публикации в других научных изданиях

5. Savichev, O.G. The nonlinear effects based on peat chronology data in paleoclimatic reconstructions / O.G. Savichev, M.V. Reshetko, **Yu.A. Moiseeva** // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 43. P. 1-5. 012034 doi:10.1088/1755-1315/43/1/012034.
6. **Моисеева Ю.А.** Методика палеогидрологических исследований в бассейне реки Обь в голоцене // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. г. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1 – С. 679-681.
7. **Моисеева Ю.А.** Современные изменения элементов климата на территории севера Западной Сибири // Современные исследования в геологии: сборник тезисов Всероссийской научно-практической молодежной конференции, Санкт-Петербург, 25-27 Марта 2016. - Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2016 – С. 116-117
8. **Моисеева Ю.А.** Влияние климатических факторов на изменения уровней грунтовых вод с. Подгорное // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения М.И. Кучина. – г. Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 1 – С. 558-559.
9. Савичев, О.Г. Модель внутригодового распределения стока для решения геологических задач / О.Г. Савичев, **Ю.А. Моисеева** // Труды Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018, ИМКЭС СО РАН, г. Томск. – 2018. – С. 226-229