

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Кузеванов Константин Константинович

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Специальность 1.6.6. - Гидрогеология

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук,
профессор Дутова Е.М.

Томск–2022

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1. Обзор современных представлений о геохимии подземных вод хозяйственно-питьевого назначения.....	11
1.2. Геологическая и гидрогеологическая изученность территории исследований	17
1.3. Постановка проблемы исследований.....	26
2. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	29
2.1. Физико-географические условия	29
2.2. Геологическое строение	30
2.3. Гидрогеологические условия	34
3. ВОДОСНАБЖЕНИЕ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ.....	46
4. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	60
4.1. Подготовка исходных данных химического состава подземных вод для картографических построений и анализа региональных закономерностей.....	60
4.1.1. Подготовка информационной таблицы гидрогеологического содержания ..	60
4.1.2 Подготовка и актуализация картографического материала.	62
4.2. Методика гидродинамического моделирования.....	63
4.3. Методика морфоструктурно-гидродинамического анализа	69
5. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ	86
5.1. Региональные гидрогеохимические закономерности.....	86
5.2. Геохимические особенности месторождений подземных вод	102
5.2.1. Геохимические условия Стрежевского месторождения подземных вод....	104
5.2.2. Геохимические особенности Томского и Северского месторождений подземных вод	122
5.2.2.1. Томское месторождение подземных вод	124
5.2.2.2. Северское месторождение подземных вод.....	143
5.2.3. Геохимические условия Академического месторождения подземных вод	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	170
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	173

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обеспечение населения качественной питьевой водой является одной из важнейших задач современности. Именно качество питьевой воды в значительной степени определяет экологическую безопасность жизни и здоровья населения. Томская область в этом отношении находится в весьма благоприятных природных условиях, имеется неограниченное количество водных ресурсов, оцененных запасов подземных вод. Водоснабжение населения Томской области организовано на достаточно хорошем уровне, практически полностью обеспечено подземными водами. Вместе с тем, они в естественном состоянии зачастую уже являются некондиционными по ряду нормируемых компонентов. В этой связи, изучение геохимических особенностей подземных вод хозяйственно-питьевого назначения в естественных и нарушенных условиях, имеет особую актуальность.

На настоящее время геохимия пресных подземных вод, использующихся зачастую как источник водоснабжения, достаточно внимательно изучена. Благодаря работам известных ученых В.П. Зверева, Г.Н. Каменского, В.А. Кирюхина, А.И. Короткова, С.Р. Крайнова, А.М. Овчинникова, А.И. Перельмана, Е.В. Пиннекера, Б.И. Писарского, Б.Б. Польшова, Е.В. Посохова, Б.Н. Рыженко, Ф.П. Саваренского, Н.И. Толстихина, С.Л. Шварцева, В.М. Швеца и многих их последователей были разработаны теоретические положения о факторах и механизмах формирования химического состава подземных вод, проведены обобщения по химическому составу подземных вод зоны гипергенеза, систематизированы данные и получены средние (кларковые) содержания широкого ряда химических элементов в подземных водах основных ландшафтных зон земного шара, сформированы представления о широтной и вертикальной глубинной гидрогеохимических зональностях, выделены провинции нормируемых химических элементов, развиты фундаментальные представления о системе “вода–порода” и ее способности к самоэволюции и самоорганизации.

В границах объекта исследований гидрогеологические, гидрогеохимические условия верхней части осадочного чехла Западно-Сибирской плиты и Томского

выступа отражены в работах А.А. Балобаненко, М.Б. Букаты, В.Я. Бычкова, Л.С. Бычковой, Н.Н. Винниченко, Е.М. Дутовой, Н.А. Ермашовой, В.А. Зуева, В.Г. Иванова, А.Э. Конторовича, А.Р. Курчикова, Б.Ф. Маврицкого, Ю.В. Макушина, В.М. Матусевича, А.Д. Назарова, В.А. Нуднера, Г.Л. Плевако, Д.С. Покровского, В.К. Попова, Н.М. Рассказова, А.А. Розина, Ю.К. Смоленцева, П.А. Удодова, С.Л. Шварцева и других.

Имеющаяся в настоящее время цифровая платформа для картирования гидрогеологических и гидрогеохимических условий, гидродинамического моделирования и анализа гидрогеохимических процессов позволяют на новом уровне подойти к решению многих вопросов

Объектом исследования являются подземные воды верхней части геологического разреза, наиболее активно используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения Томской области в естественных и нарушенных в процессе эксплуатации условиях.

Цель работы заключается в выявлении геохимических особенностей и качества подземных вод хозяйственно-питьевого назначения Томской области в естественных региональных условиях и эксплуатируемых крупными водозаборами, с использованием современной цифровой платформы средств ГИС-технологий, гидродинамического и, морфоструктурно-гидрогеологического анализа.

Основные задачи:

1. Дать характеристику природных ландшафтно-климатических, геологических, гидрогеологических условий территории и особенностей организации водоснабжения населения Томской области.
2. Привести характеристику гидрогеологических условий районов, выбранных типовых эксплуатируемых месторождений подземных вод.
3. Обосновать методику обобщения данных гидрогеохимических региональных и детальных исследований на выбранных типовых эксплуатируемых месторождениях подземных вод.

4. Уточнить известные ранее региональные закономерности изменчивости химического состава подземных вод, использующихся для водоснабжения населения района исследований.

5. Оценить особенности изменения состава и качества подземных вод ряда эксплуатируемых месторождений подземных вод.

Материалы и методы исследований. В основу работы положены фактические материалы, собранные в ходе исследований, проводимых сотрудниками отделения геологии (в прошлом кафедры ГИГЭ Томского политехнического университета) с 2005 г. по настоящее время, где автор принимал непосредственное участие), фактические данные и фондовые материалы геологических и гидрогеологических отчётов ООО «Томскгеомониторинг».

Исследования состава подземных вод выполнены с применением современных сертифицированных аналитических методов в проблемной научно-исследовательской лаборатории ТПУ, лабораториях ООО «Томскгеомониторинг» и других геологических организаций региона.

Всего для региональных исследований было использовано 1107 анализов воды, а для выявления геохимических изменений на выбранных типовых эксплуатируемых месторождениях подземных вод 500 анализов.

Хранение, обобщения и обработка аналитических и картографических данных осуществлялись с помощью методов математической статистики и ГИС-технологий, реализованных в пакетах программ Excel, Statistica, Surfer, ArcGIS 10.3. Промежуточные расчеты производились встроенными возможностями регрессионного анализа Microsoft Excel. Гидродинамические расчеты проводились с использованием GMS, FeFlow.

Личный вклад автора.

Автором осуществлен сбор, анализ и обработка фактического материала по объекту исследований (в естественных региональных условиях и в условиях эксплуатации крупными водозаборами). Выполнены картографические построения с использованием ГИС-технологий, интерпретированы результаты работы и сформулированы выводы. В работе использованы личные наблюдения автора при

проведении полевых работ. Все разделы диссертации подготовлены автором лично. Подготовлена значительная часть публикаций. **Основные положения** и выводы диссертационной работы опубликованы в рецензируемых изданиях.

Защищаемые положения.

1. В естественных условиях химический состав подземных вод палеогеновых отложений формируется под влиянием ландшафтно-климатических условий, состава водовмещающих пород и перекрывающих толщ. На большей части территории формируются пресные подземные воды, наименее минерализованные - в условиях среднетаежных ландшафтов в отложениях континентального генезиса, перекрытых преимущественно песчаными и супесчаными осадками, а наиболее минерализованные - в условиях южно-таежных ландшафтов, в отложениях прибрежно-морского и морского генезиса, перекрытых преимущественно глинистыми и суглинистыми осадками. Локально установлено наличие благоприятных условий для разгрузки подземных вод меловых отложений, имеющих повышенную минерализацию. По результатам морфоструктурно-гидрогеологического анализа суммарная территория таких участков достигает 5%, а закартированная площадь подобных азональных аномалий не превышает 1%.
2. Эксплуатация подземных вод палеогеновых отложений приводит к изменению параметров среды и миграционной способности переменного-валентных химических элементов с привлечением некондиционных вод из смежных горизонтов, что при интенсификации водоотбора влияет на качество добываемых вод. В условиях среднетаежных ландшафтов в эксплуатируемых водах увеличиваются, а в условиях южно-таежных ландшафтов уменьшаются содержания железа, появляются индикаторы загрязнения – хлориды, атипичный микробиологический состав, активизируются перетоки вод из меловых отложений, фиксирующиеся повышенными аномалиями хлора и минерализации. Степень проявления изменений состава определяется интенсивностью вертикальных перетоков, количественная оценка которых

может быть установлена с применением гидродинамических расчетов и численного моделирования.

3. Эксплуатация месторождений подземных вод, приуроченных к фундаменту артезианского бассейна на его юго-восточной окраине, при интенсификации водоотбора активизирует окисление сульфидов в зоне аэрации и в толще пиритизированных водовмещающих пород. Подкисление вод и более высокие концентрации сульфат-иона усиливают миграционную способность элементов и повышают растворимость карбонатных минералов. Это приводит к росту общей жесткости, иногда выше предельно допустимых значений.

Научная новизна.

1. Получены определенные в зависимости от основных ведущих факторов количественные оценки пространственного распределения отдельных компонентов химического состава подземных вод палеогеновых отложений.
2. Создан комплект цифровых гидрогеохимических карт масштаба 1:500 000 для меловых и палеогеновых отложений в пределах территории Томской области: карты содержания гидрокарбонат-иона, карты общей минерализации подземных вод, карты изменчивости рН подземных вод, карты химических типов подземных вод.
3. На основе применения морфоструктурно-гидрогеологического анализа локализованы участки, где разгрузка подземных вод меловых отложений, залегающих ниже по разрезу, наиболее вероятна и определена их суммарная площадь.
4. Показано, что появление повышенных содержаний элементов в водах (иногда, превышающих нормативные значения) обусловлено как природными факторами, так и особенностями изменения состава и качества подземных вод в процессе их эксплуатации.
5. Установлено, что длительная эксплуатация подземных вод палеогеновых отложений приводит к изменению параметров среды и миграционной способности переменновалентных химических элементов с привлечением

некондиционных вод из смежных горизонтов, что влияет на содержание ионов железа и появление индикаторов поверхностного загрязнения.

6. Доказано, что интенсивная эксплуатация месторождений подземных вод, приуроченных к породам фундамента, приводит к подкислению вод, повышению растворимости карбонатных минералов и способствует росту общей жесткости.

Практическая значимость:

1. Полученный автором значительный объем современных представлений о региональной и временной изменчивости химического состава подземных вод по расширенному количеству показателей в дальнейшем может быть использован для обеспечения различных прикладных исследований.
2. На основе анализа опыта длительной эксплуатации подземных вод палеогеновых отложений показано, что часто встречающееся в практике подсчёта запасов упрощение расчётной схемы до типовых условий изолированного неограниченного напорного пласта, не оправдано с позиций снижения достоверности длительного прогноза работы водозабора в отношении стабильности качества добываемой воды, требуется дополнять прогноз учетом дополнительного питания.
3. На примерах водозаборов, находящихся в работе длительное время показано, что надежность прогноза качества подземных вод при их эксплуатации может повысить применение численного моделирования гидрогеологических условий. При этом для крупных водозаборов рекомендуется использовать постоянно действующие модели, а на одиночных водозаборах применять численное моделирование на этапе обработки опытно-фильтрационных работ с целью уточнения характера граничных условий и обоснования расчётной схемы для подсчёта запасов подземных вод.
4. Установлено, что в условиях опасности появления процессов перетекания недопустимо сокращение времени проведения опытно-фильтрационных работ для более строгой квалификации граничных условий. Ограничение продолжительности опыта только периодом наступления квазистационарного

режима водопритока способствует утрате важнейшей гидрогеологической информации о характере граничных условий.

5. Доказана эффективность применения морфоструктурно-гидрогеологического анализа не только для выявления участков потенциальной разгрузки подземных вод отложений мелового возраста, но и для количественной оценки глубины залегания границы между гидродинамическими зонами активного и замедленного водообмена.

Полученные автором результаты могут быть полезны специалистам, чьи интересы связаны с проблемами экологической безопасности и решением хозяйственно-питьевых проблем, направленных на разработку перспективных планов водоснабжения населения.

Достоверность полученных результатов обусловлена большим объемом фактического материала, использованием современных аналитических методов, применением в процессе обработки данных статистических методов анализа, гидродинамических и термодинамических расчетов, а также анализом широкого круга научных публикаций, фондовых материалов по теме диссертации. Теоретические построения основаны на современных представлениях о причинно-следственных связях ведущих природных факторов и закономерностях формирования химического состава вод, современных научных представлениях об эволюции системы "вода-порода".

Апробация результатов исследования и публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на конференциях, совещаниях и симпозиумах различного уровня. По результатам работы опубликованы 9 научных работ, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК, и в журналах, входящих в БД Scopus и Web of Science.

Апробация работы. Результаты исследований были использованы при выполнении работ в рамках х/д 2-159/05 «Составление комплекта специализированных гидрогеохимических прогнозных на уран карт по трем палеофациальным уровням (юрскому, меловому и палеоген – неогеновому)

окраины Западно – Сибирской плиты в Томской, Омской областях 1: 1 500 000 масштаба на прогнозируемых перспективных площадях».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 122 наименований. Объем текста – 185 с., количество таблиц – 19, рисунков – 88.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю – профессору отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов д.г.-м.н. Е.М. Дутовой, а также д.г.-м.н. Д.С. Покровскому, к.г.-м.н. К.И. Кузеванову, к.г.-м.н. Н.Г. Наливайко и сотрудникам отделения геологии ТПУ за постоянную поддержку и всестороннюю помощь в выполнении исследований.

Автор благодарит сотрудников ФГБУ «Гидроспецгеология» и ООО «Томскгеомониторинг»: к.г.-м.н., директора филиала «Сибирский региональный центр ГМСН» В.А. Льготина, к.г.-м.н., начальника отдела Государственного мониторинга за участками загрязнения подземных вод филиала «Сибирский региональный центр ГМСН» А.А. Балобаненко, начальника отдела Д.Н. Четвергова, ведущего гидрогеолога Г.А. Жульмину, ведущего специалиста Н.Ю. Рукс, ведущего гидрогеолога В.П. Шинкаренко за помощь и консультации по вопросам, возникавшим в ходе выполнения работы.

1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Обзор современных представлений о геохимии подземных вод хозяйственно-питьевого назначения

В изучении подземных вод верхней части геологического разреза, которые зачастую используются для хозяйственно-питьевого назначения, неопределима роль академика В.И. Вернадского. Его последователи – А.П. Виноградов, В.А. Кирюхин, С.Р. Крайнов, А.М. Овчинников, А.И. Перельман, Б.Б. Польшов, А.Е. Ферсман, С.Л. Шварцев, подчеркивали в своих трудах роль выдающегося ученого-естествоиспытателя. Именно Вернадским даны классические характеристики кислорода, углерода, кремния, марганца, йода и других элементов в геохимии, установлены общие законы миграции. Воде он определил, среди всех природных тел, слагающих зону гипергенеза, особую роль, обосновал положение о единстве природных вод, которое определяется сложными взаимодействиями в системе «вода - порода - газ - живое вещество» [16, 17, 90].

В.И. Вернадский впервые сформулировал содержание новой отрасли знаний, которое легло в основу современной гидрогеохимии или геохимии подземных вод. Подземные воды надо рассматривать как часть общей системы природных вод Земли, а геохимию подземных вод – как часть химии природных вод.

Вслед за Ф. Кларком он сделал попытку дать количественную характеристику распространения химических элементов в зависимости от типа природных вод и впервые сделал обобщения с позиции геохимии накопленного к тому времени фактического материала.

Подчеркивая значимость в науке в целом, в гидрогеохимии и гидрогеологии в частности С.Л. Шварцевым, и под его редакцией, были переизданы труды Вернадского [1].

Развитие геохимии подземных вод в нашей стране связано с именами многих известных ученых. Гидрогеологами, геохимиками, географами, почвоведом проводилось планомерное изучение процессов гипергенеза, развитие исследований процессов почвообразования, выветривания и корообразования, геохимии гипергенных процессов и геохимии ландшафта, биогеохимии. Результатами этих

исследований стало формирование в нашей стране нескольких гидрогеохимических школ: Ленинградская школа гидрогеохимиков (ЛГИ, ЛГУ, ВСЕГЕИ), Гидрогеохимическая школа ВСЕГИНГЕО, Томская гидрогеохимическая школа, Гидрогеохимическая школа МГУ и ряда других.

Важнейшую роль здесь сыграли Игнатович Н.К., Каменский Г.Н., Овчинников А.М., Германов А.И., Посохов Е.В., Альтовский М.Е., Удодов П.А., Виноградов А.П., Валяшко М.Г., Толстихин Н.И., Зайцев И.К., Макаренко Ф.А., Бродский А.А., Иванов В.В., Пиннекер Е.В., Перельман А.И., Кирюхин В.А., Крайнов С.Р., Швец В.М., Шварцев С.Л., Зверев В.П., Капченко Л.Н., Кононов В.И., Щербаков А.В., Басков Е.А., Смирнов С.И., Полынов Б.Б., Гинзбург И.И., Чухров Ф.В., Глазовская М.А., Добровольский В.В., Македонов А.В., Кашик С.А., Бугельский Ю.Ю. и многие другие.

Начало работ в направлении изучения геохимии подземных вод зоны гипергенеза связано с изучением питьевых и пресных лечебных вод. Вслед за Вернадским это направление развивали А.П. Виноградов, Г.Н. Каменский, А.Н. Бунеев, А.М. Овчинников, Н.И. Толстихин, М.И. Врублевский, О.К. Ланге, А.С. Уклонский, А.В. Щербаков, С.Р. Крайнов, В.М. Швец и другие.

Изучением испарительного и биогенного этапов формирования подземных вод на основании исследований болотных и почвенных вод занимались такие ученые, как К.К. Гедройц, И.Н. Антипов-Каратаев, Н.С. Курнаков, В.А. Ковда, Н.И. Базилевич, М.Г. Валяшко, Г.Н. Каменский, О.К. Ланге, И.Н. Скрышникова, В.В. Пономарева, Л.Н. Дженс-Литовский и другие.

Изучением вопросов распространения в подземных водах зоны гипергенеза тяжелых металлов и радиоактивных химических элементов при разработке гидрогеохимического метода поисков рудных месторождений занимались такие ученые как А.И. Германов, А.В. Щербаков, А.Н. Токарев, А.К. Лисицин, А.М. Овчинников, А.А. Бродский, П.А. Удодов, Е.Е. Белякова, С.П. Атбул, Г.А. Голева, С.Р. Крайнов, Н.М. Рассказов, В.А. Кирюхин, Б.А. Колотов, С.Л. Шварцев и другие.

В 60-70-х годах прошлого столетия по результатам масштабного проведения гидрогеологических и геологических съемок и исследований химического состава вод была издана 45 томная монография Гидрогеология СССР. В книге впервые подведены итоги многолетних гидрогеологических и инженерно-геологических исследований.

С работами Б.Б. Полынова связаны исследования геохимии подземных вод при изучении процессов выветривания и формирования кор выветривания, а также литогенеза в целом. Ему принадлежат идеи о новообразовании глинистых минералов путем синтеза из растворенных ионов, понятия о подвижности химических элементов и стадийности их выщелачивания из алюмосиликатных горных пород [22]. Работы по геохимии ландшафта, учение о геохимических барьерах, геохимическая классификация элементов по характеру их подвижности, коэффициент и классы водной миграции А.И. Перельмана являются развитием идей Б.Б. Полынова [58 - 62]. Дальнейшее развитие этого направления связано с именами Н.И. Гинзбурга, К.И. Лукашева, Ж. Милло, У.Д. Келлер и других. Экспериментальным моделированием процессов выветривания занимались И.И. Гинзбург, Ж. Педро, Л.А. Матвеева, В.И. Бгатов, Н.А. Лизалек и другие. Работы по изучению взаимодействия состава воды и характера продуктов выветривания проводили И. Тарди, И.Д. Хем, Ю.Ю. Бугельский, Дж. Драйвер и другие. В результате исследований Ф.П. Саваренского, Ф.А. Макаренко, В.П. Зверева, С.Л. Шварцева и других получены данные о величине модуля подземного химического выноса.

С.Л. Шварцевым предложена схема соподчиненности основных природных факторов, действующих опосредованно через их производные, которые контролируют характер геохимической среды, направленность выветривания горных пород и условия формирования химического состава подземных вод. Данные заключения являются продолжением идеи о геосферах и земных оболочках В.И. Вернадского [3].

Систематизации всех факторов, их связи между собой, их классификации посвящены работы Е.В. Посохова, К.Е. Питьевой, Г.Ю. Валукониса, А.Е. Ходькова,

Е.В. Пиннекера и других [63 - 65, 76, 77]. Роль климатического фактора, оказывающего непосредственное влияние на формирование зональности подземных вод, подробно освещена в работах В.В. Докучаева, П.В. Отоцкого, В.С. Ильина, Н.К. Игнатовича, Г.Н. Каменского, О.К. Ланге, И.В. Гармонова и других. Вопросами влияния рельефа и состава горных пород на формирование подземных вод занимались И.М. Гинзбург, А.А. Бродский, Ю.Ю. Бугельский, Р.С. Кононова, А.А. Лукин и другие.

Региональные закономерности геохимии пресных вод освещены в работах Г.А. Максимовича, К.Е. Питьевой, Н.А. Маринова, И.К. Зайцева. Работы С.Р. Крайнова, В.М. Швеца, В.А. Кирюхина и Б.Н. Рыженко посвящены геохимии подземных вод зоны гипергенеза.

С.Л. Шварцев впервые провел систематизацию и выполнил обобщение значительного массива данных о химическом составе подземных вод по отдельным территориям и ландшафтным зонам. В своих работах он подробно освещал вопросы геохимии подземных вод зоны гипергенеза всего Земного шара [89].

Одновременно развивается направление геохимии подземных вод, связанное с выполнением физико-химических расчетов состава подземных вод, формы миграции, моделирование геохимических процессов в системе вода-порода-газ-органическое вещество. Развитие этого направления, прежде всего, связано с именами Д.С. Коржинского, Р.М. Гаррелса, Ч.С. Крайста, В.А. Жарикова, П.Б. Бартона, Х.К. Хелгесона, И.К. Карпова, Г.Б. Наумова, Б.Н. Рыженко, И. Тарди, П. Пачеса, Дж. Дривера, В.Н. Озябкина, М.Б. Букаты и многих других.

Необходимо особо отметить научное направление изучения геологической эволюции системы вода - горная порода, которое возникло и развивалось при непосредственном и активном участии С.Л. Шварцева. В рамках этого направления утверждается, что в естественных условиях всех участков земной коры вода непрерывно растворяет одни минералы и формирует новые вторичные продукты – водный раствор всегда неравновесен с отдельными минералами магматического или метаморфического генезиса, но одновременно равновесен с определенным

перечнем минералов, слагающих вторичные минеральные образования. Таким образом, система вода – горная порода является равновесно-неравновесной.

Определяющим фактором выступает время взаимодействия воды с горными породами, которое определяет состояние насыщения водного раствора к определенным минералам. Этот процесс носит последовательный характер – каждый этап степени насыщения характеризуется строго определенной ассоциацией вторичных минеральных образований, на основании чего можно сделать вывод о соответствующем геохимическом типе подземных вод.

Гидрогеохимическим исследованиям в контексте хозяйственно-питьевого использования ресурсов подземных вод в России уделяется немало внимания [3 - 5, 8, 11 - 13, 21, 31, 38, 44, 47, 67, 82, 85, 86, 104, 109]. Данной проблемой занимались представители различных гидрогеохимических школ страны: А.В. Лехов, С.П. Поздняков, Ю.В. Шваров, С.Р. Крайнов, В.М. Швец, Е.М. Дутова, Д.С. Покровский. Авторы неоднократно отмечали важность этой проблемы.

В работах С.Р. Крайнова, В.М. Швеца [38, 39] освещены вопросы оценки качества питьевых подземных вод. Рассмотрены распределение компонентов в подземных водах, их физико-химическое состояние и формы участия в гидрогеохимических процессах. Особое внимание уделено изменению физико-химических условий среды миграции элементов под влиянием антропогенного загрязнения подземных вод и эксплуатационного водоотбора. Показаны возможности методов физико-химической термодинамики для прогноза качества подземных вод.

А.В. Лехов и Ю.В. Шваров [48] исследовали влияние длительной эксплуатации водозабора подземных вод в условиях наличия пирита в покровных отложениях. Они показали, что понижение уровня подземных вод может приводить к осушению толщ, содержащих пирит, что вызывает интенсивное окисление последнего. Также показано, что в результате минерализация подземных вод начинает расти, главным образом, за счет сульфат-иона и общей жесткости.

Подобные исследования проводились для водозаборов подземных вод в

Томской области. Для водозабора из подземных источников Академгородка (г. Томск) авторами Е.М. Дутовой, Д.С. Покровским [70] установлено, что уменьшение концентраций растворенных форм железа происходит одновременно с устойчивым во времени повышением в подземных водах величин сульфат-иона и общей жесткости. Аэрация недр в условиях нарушенного гидродинамического режима при длительной эксплуатации водозаборных сооружений является ведущим фактором изменений. Отмечено изменение гидрогеохимических показателей в технологическом процессе водоподготовки и последующей транспортировке воды потребителю.

За рубежом все большее внимание также уделяют проблемам качества подземных вод [100 - 103, 107, 108, 111, 112, 114 - 122]. В этой связи активно развиваются гидрогеохимические исследования, изучаются процессы формирования химического состава вод под воздействием антропогенных факторов. Очень активно велись и ведутся в настоящее время исследования по количественному изучению геохимических процессов, гидрогеохимическое моделирование в специализированных программных комплексах.

Особенно из зарубежных исследователей следует отметить Р.В. Гаррелса, который обосновал применение методов химической термодинамики в геохимических исследованиях [15, 14]. Следует назвать также Дж. Дривера, Г. Хелгесона, Т. Пачеса, А. Трасделла, Дж. Хема, Р. Бернера, Д. Пламмера и других, которые заложили основы количественного познания процессов, составляющих основу гидрогеохимических явлений. Количественное изучение геохимических процессов, сопровождаемое постоянной работой по получению параметров, их характеризующих и позволяющих выполнять расчеты, рассмотрены в работах Р. Смита, А. Мартелля, Г. Хелгесона, Д. Нордстрема, К. Питцера, а также предложены способы вычисления термодинамических параметров, необходимых для расчета, интерпретации и прогноза гидрогеохимических явлений. По результатам исследований изданы фундаментальные справочные монографии, пользующиеся большой популярностью во всем мире.

1.2. Геологическая и гидрогеологическая изученность территории исследований

На рисунках 1-3 представлена геологическая и гидрогеологическая изученность территории. По площади и по вертикальному разрезу территория изучена неравномерно. Наиболее изучена трехсотметровая толща: верхний гидрогеологический этаж верхнемел-четвертичных отложений и меловые отложения нижнего гидрогеологического этажа.

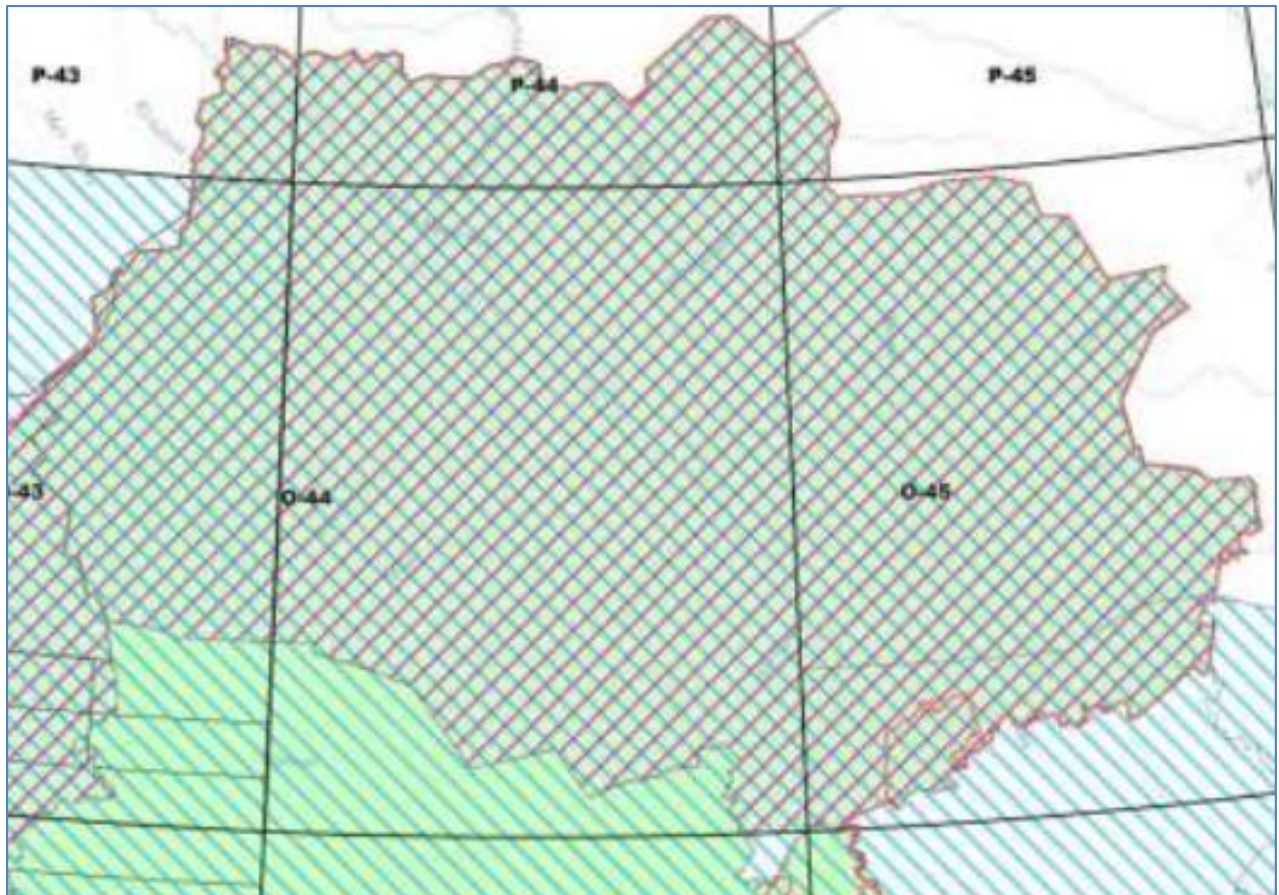
Региональной основой изученности территории являются проводимые в 50-90-х годах прошлого столетия поисково-разведочные работы для целей обеспечения населения подземными водами пригодными для целей хозяйственно-питьевого назначения. Проводились среднемасштабные геолого-гидрогеологические и комплексные гидрогеологические и инженерно-геологические съемки. Вскоре работы начинают проводиться на регулярной основе, а по их результатам издаются ежегодники.

Систематическое изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий территории связано с проведением геологосъемочных работ масштаба 1:200 000. Геологические съемки для оценки основных компонентов состава подземных вод с целью пригодности для водоснабжения, как правило, сопровождались неполным комплексом гидрогеологических и инженерно-геологических исследований, соответствующих условиям мелкомасштабного картирования (1:500 000).

С 1958 по 1972 гг. были созданы государственные геологические и гидрогеологические карты масштаба 1:200 000 на основании проведенных большей части Западно-Сибирского артезианского бассейна кондиционных геолого-гидрогеологических съемок масштаба 1:500 000 и 1:200 000.

В.П. Щипачевым в 1959 г. были сведены в кадастр подземных вод собранные материалы по эксплуатационным, структурно-поисковым и разведочным скважинам, а также составлены гидрогеологическая карта Томской области масштаба 1:2 500 000 и гидрогеологическая карта основных водоносных




горизонтов Томской области масштаба 1:500 000, разработана классификация и дана схема районирования подземных вод области по условиям водоснабжения.




Условные обозначения

1. Изученность территории



Масштаб 1: 1 000 000

-  Геохимическая
-  Гидрогеологическая (геолого-гидрогеологическая)
-  Эколого-геологическая

Номенклатурные листы

-  масштаб 1: 1 000 000

2. Речная сеть

-  Озера и водохранилища
-  Водотоки

3. Границы административные






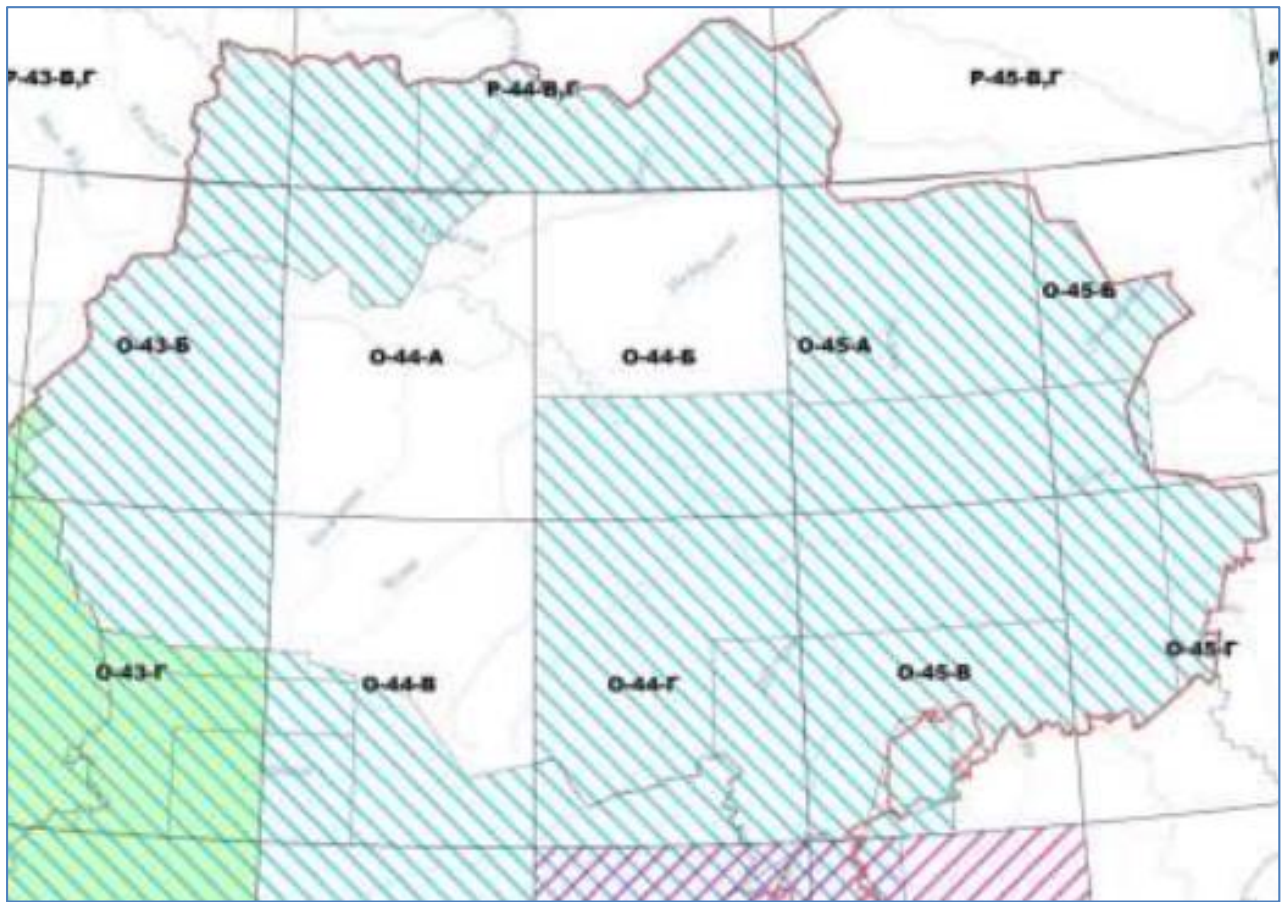
-  Район исследований
-  Государственные РФ
-  Федеральных округов
-  Областей, республик
-  Зарубежных государств

Рисунок – 1 Изученность исследуемой территории масштаба 1:1 000 000 [1]






Рисунок– 2 Изученность исследуемой территории масштаба 1:500 000 [1]



Условные обозначения

Изученность территории

Масштаб 1: 200 000

-  Геохимическая
-  Эколого-геологическая
-  Гидрогеологическая
(геолого-гидрогеологическая)

Номенклатурные листы

 масштаба 1: 200 000

Рисунок – 3 Изученность исследуемой территории масштаба 1:200 000 [1]

В Томской области также неоднократно проводилась оценка условий водоснабжения подземными водами городов и населенных пунктов области в особый период в 1967-1970 гг. "Вода-II" и 1985-1987 гг. "Вода-III" с оценкой защищенности подземных вод от загрязнения. Рассчитаны максимальные производительности водозаборов для их эксплуатации и созданы справочники по условиям водоснабжения.

В 1973-1980 гг. в пределах Томской области выполнена региональная оценка эксплуатационных запасов подземных вод южной части Западно-Сибирского

артезианского бассейна [34], а в 1984-1989 гг. – региональная оценка прогнозных ресурсов подземных вод восточных районов Томской области [66]. Для каждого оцениваемого водоносного комплекса, в процессе проведения региональных работ, были оценены прогнозные ресурсы широко эксплуатируемых ВГ, составлены комплекты специализированных карт, характеризующие гидродинамические и гидрогеохимические показатели подземных вод.

В 1971-1984 гг. выполнена региональная оценка эксплуатационных запасов подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна (западная часть левобережья Томской области, Новосибирская и Омская области) [78, 83].

В 1976-1982 гг. Ермашовой Н.А. на территории Томской области проведены работы по обобщению материалов по химическому составу питьевых подземных вод в связи с повышенным содержанием в них Fe, Mn и других специфических для региона компонентов южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна [24, 25]. Оценены основные гидрогеохимические закономерности в зоне активного водообмена, факторы и процессы формирования химического состава подземных вод Томской области.

В 1978-1996 гг. ВСЕГЕИ составлены детальные геохимические разрезы (по 20 химическим элементам более чем 50 опорных скважинах) практически без перерыва от доюрского фундамента до новомихайловской свиты (Р_{3nm}) включительно на основе анализа результатов геохимического изучения керна скважин опорных, параметрических, нефтегазопроисловых и картировочных (при геологической съемке масштаба 1:200 000). Выполнено геохимическое районирование площади листов N-43 и O-43 в составе сводной геохимической карты территории Западной Сибири с использованием моно- и полиэлементных геохимических карт в масштабе 1:2 500 000. Установлены вертикальная и горизонтальная геохимические зональности – соответственно эпохи накопления ряда элементов и закономерные изменения их концентрации по латерали.

За период 1988-1993 гг. проводились работы по определению основных критериев изучения и прогноза изменения состояния и качества подземных вод на

территории Томской области [93] с установлением источников загрязнения подземных вод. С учетом приоритетных видов хозяйственной деятельности выделены участки: Северный участок – промышленный (эксплуатационная добыча нефти и газа), Западный – подготовка к промышленному освоению углеводородов, Южный – агропромышленный.

В период 1994-2001 гг. в пределах границ каждого субъекта РФ выполнялись работы по оценке обеспеченности населения ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения в соответствии с Федеральной программой. В рамках этих работ подготовлены материалы, включающие современное состояние подземных вод по различным показателям и оценена величина естественных ресурсов подземных вод. ГИДЭК выполнил по завершению этих работ их обобщение по территории России, в том числе подготовлены цифровые версии картографического материала Томской области (карта модулей подземного стока, защищенности) – Филиал Томская геологоразведочная экспедиция ОАО «Томскнефтегазгеология» ВНК (Степанова Т.Л.) [84].

Во второй половине XX века проведен основной объем площадных геологоразведочных работ на территории. В начале XXI века произошло их резкое сокращение. В 1990-х, начале 2000-х преобладающим направлением являлось гидрогеологическое, геолого-гидрогеологическое и инженерно-геологическое доизучение отдельных территорий в масштабе 1:200 000. В 2000 г. и 2001 г. выполнены работы по гидрогеологическому доизучению масштаба 1:200 000 листов О-45-XXXI (Междуречная площадь) и О-44-VII (Мыльджинская площадь).

С 1995 г. ежегодно выполняются территориальные и региональные работы по государственному мониторингу состояния недр на территории всех субъектов Сибирского федерального округа. В рамках него изучается состояние подземных вод, в том числе изменение состава под влиянием природных и техногенных факторов, изучаются прогнозные ресурсы и запасы подземных вод, добыча и использование питьевых, технических и минеральных вод.

В этот период проводятся специализированные, тематические работы, привязанные к локальным объектам под конкретные цели.

Активно выполнялись работы для нефтегазовой отрасли. В 1997-2001 гг. выполнялись работы по изучению стратиграфических, гидрогеологических, литолого-фациальных и геохимических особенностей юрских отложений в связи с перспективами их нефтегазоносности.

Проводятся работы по оценке запасов пресных и соленых вод для хозяйственно-питьевых целей и поддержания пластового давления. Выполняются гидрогеологические исследования для выбора пластов коллекторов и возможности размещения подтоварных и сточных вод с целью их захоронения.

Геологоразведочные работы дополняются геоэкологическими исследованиями.

В 2000 г. ГУП ТЦ Томскгеомониторинг начаты работы по созданию цифровой геоэкологической карты западной Сибири масштаба 1:1 000 000, на основании ранее выполненных работ ГЭИК в пределах отдельных субъектов (Тюменская, Томская, Омская и Новосибирская области). Результатом работ стал комплект карт, состоящий из нескольких наборов: подземные и поверхностные воды, ландшафтно-геохимические условия, литогенная основа и геологические процессы, техногенные объекты и системы (комплексы), оценка экологического состояния геологической среды. Работы были из-за прекращения финансирования остановлены.

В 2000 г. Гольшевым С.И. (Томское отделение Сибирского НИИ геологии, геофизики и минерального сырья) для территории южной части артезианского бассейна проведен комплексный анализ факторов, определяющих содержание жизненно необходимых (эссенциальных) микроэлементов в пресных подземных водах основных водоносных горизонтов.

В 2000 г. ФГУП «Березовгеология» выполнены работы по оценке перспектив ураноносности плитного комплекса южной окраины Западно-Сибирской платформы с целью определения главных направлений поисков урановых месторождений. Выполненные работы позволили выделить наиболее перспективный – палеодолинный тип гидрогенного уранового оруденения, к которому относится большая часть выявленных урановородных объектов

(Малиновское месторождение и др.). Дана характеристика выделенных Аболаковской, Мариинской, Кулундинской перспективных площадей для первоочередной постановки работ на уран масштаба 1:200 000 - 1:50 000 и даны рекомендации по поискам уранового оруденения в мезозойско-кайнозойских отложениях, построены радиогидрогеохимические карты.

Активное развитие хозяйственной деятельности привело к невозможности использования для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения поверхностных вод и вод и подземных вод незащищенного первого от поверхности четвертичного водоносного горизонта. Для этой цели стали осваиваться хорошо защищённые водоносные горизонты.

В 2000-2001 гг. Зятевой О.Ф. выполнены работы по изучению гидрогеохимического режима проявлений минеральных вод в районах Томской области. Начиная с 2001 г. Назаровым А.Д. начаты работы по гидродинамическому и гидрохимическому режиму томских родников, выделены ландшафтно-родниковые зоны на территории г.Томска. [54, 55].

В 2000–2002 гг. выполнены геолого-экологические исследования и картографирование (ГЭИК) различных масштабов в пределах Томской, Омской и Новосибирской областей.

В 2005-2010 гг. в Томской области проводились комплексные специализированные исследования в пределах, так называемого, полигона «Томский» с целью оценки влияния СХК: геолого-геофизическое доизучение территории, водно-гелиевая съемка, определение содержаний трития и изотопов кислорода в природных водах, изучение радиационного состояния подземных вод, радиогеохимические исследования [88].

Благодаря водно-гелиевым исследованиям, которые были проведены ООО «ЛЭП», стало возможным установить, что радионуклиды в подземных водах связаны с содержанием нефтяных углеводородов в подземных минеральных хлоридных натриевых и сульфатных магниевых водах, подток которых определялся процессом миграции гелия [87].

Выполненные ООО «НТЦ ВСЕГИНГЕО» проводились исследования по влиянию технологических вод СХК, закачиваемых в нагнетательные скважины мелового водоносного горизонта на площадях подземного захоронения ЖРО. Изотопно-гидрогеохимические исследования показали, что присутствие технологических вод, во всех пунктах опробования не прослеживается. Фронт загрязненных вод за границы горного отвода СХК не вышел и продвинулся не более чем на 4 км [74].

МПП «Экогеос» выполнили работы по изучению радиоэкологической обстановки на территории Томской агропромышленной агломерации. Выполнялось исследование подземных вод и почв. По результатам выполненных радиоэколого-геохимических исследований сделан вывод, что почвы, являются депонирующей средой, отражающей четкие следы техногенной нагрузки, а загрязнения со временем могут попасть в подземные воды. [96].

Радиогеохимические исследования Центра экологической оценки и мониторинга Томского политехнического университета показали, что максимальные концентрации тяжелых металлов, редких, редкоземельных и радиоактивных элементов в почве и снеговом покрове наблюдаются в северо-восточном направлении от СХК. Возможно дальнейшей загрязнение подземных вод путем инфильтрации талых вод [95].

ООО «Геологоразведочная компания «ГЕОСФЕРА» было проведено геолого-геофизическое доизучение на территории «Томский». В результате выделены различные системы разрывных нарушений, пликативные структуры и блоки фундамента, дайковые пояса и нескрытые интрузивные массивы. По результатам построены картографические материалы [89].

ФГУП «ВСЕГИНГЕО» в 2008 г. завершили работы по созданию гидрогеологической карты РФ масштаба 1:2 500 000. В рамках работы впервые был создан комплект гидрогеологических карт территории РФ: гидрогеологическая карта, сопровождаемая послойными картами, раскрывающими дополнительно ее содержание, карта структур зоны свободного водообмена, карта глубоких

водоносных горизонтов, карта химического состава подземных вод, а также набор карт по минерально-сырьевой базе подземных вод [46].

В 2012 г. ФГУП «ВСЕГИНГЕО» завершили работу по теме: «Характеристика химического состава питьевых подземных вод территории Российской Федерации и разработка критериев его прогнозирования». В работе систематизированы сведения о химическом составе и качестве питьевых подземных вод по гидрогеологическим структурам, основным эксплуатируемым водоносным горизонтам и зонам. Выделены территории распространения пресных подземных вод с природным несоответствием их качества существующим требованиям, а также подвергающимся техногенному загрязнению [45].

1.3. Постановка проблемы исследований

На формирование разнообразного состава подземных вод влияют как естественные природные процессы, так и антропогенные факторы. В связи с увеличивающейся антропогенной нагрузкой на все компоненты природной среды увеличивается использование для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения подземных вод. Поэтому возрастает необходимость изучения и оценки соотношения ресурсного и гидрогеохимического потенциалов питьевых подземных вод. Пространственное обобщение материалов и районирование территорий интенсивного водопользования позволяет проследить однородность гидрогеологических условий, оценить объемную гидрогеохимическую (горизонтальную и вертикальную) зональность, создавая, таким образом, новую более совершенную гидрогеохимическую основу для поисково-оценочных работ на питьевые подземные воды с теми или иными возможностями водопользования.

При интенсивной эксплуатации подземных вод могут происходить изменения геохимического режима месторождений. Для питьевого водоснабжения подземные воды используются многие столетия, при этом долгое время основное требование к их качеству заключается в том, что они должны отвечать нормативным требованиям.

В последние десятилетия в перечень нормируемых компонентов состава подземных вод включаются элементы как природного, так и техногенного

происхождения. В связи с этим доля подземных вод, удовлетворяющих всем требованиям существенно снизилась, в том числе из-за природных особенностей химического состава.

В связи со сложившейся во многих регионах проблемной ситуацией существенно расширяется применение различных технологий водоподготовки, что позволяет доводить некондиционные подземные воды до кондиционных питьевых. Технологическую схему, метод водоподготовки воды выбирают на основе изучения сезонной изменчивости химического состава и физических свойств воды, полевых опытно-технологических исследований, прогноза изменения качества воды при эксплуатации и сопоставления с требованиями потребителя к химическому составу воды. Водоподготовка у места добычи подземных вод является более выгодной и с экономической точки зрения в связи с высокой стоимостью транспортировки вод высокого качества с других территорий.

В результате сложившегося положения зона свободного водообмена, как структурно-гидрогеологический объект, в границах которого формируются подземные воды хозяйственно-питьевого качества, целенаправленно не изучается. Нет ни региональных, ни крупномасштабных (поисково-оценочные работы) карт систем дренирования земной коры, а, следовательно, и условий распространения питьевых подземных вод, факторов локализации их ресурсов, хотя по этой части принят нормативный документ [9], устанавливающий требования к ее изучению и характеристике.

На территории исследований, в целом, не проводились специализированные исследования качества подземных вод, что негативно сказывалось на прогнозировании состояния качества. Отсутствие единого методологического подхода в проведении локальных гидрогеохимических исследований и единой гидрогеохимической основы масштаба 1:1 000 000 привело к тому, что большинство из проведенных работ и составленных карт, практически, не коррелируют между собой в рамках одной гидрогеологической структуры как в плане геолого-гидрогеологических условий, так и в плане гидрогеохимических особенностей. Отсутствие автоматизированных и дистанционных методов

наблюдения за режимом и качеством вод, слабая оснащённость аналитическим лабораторным оборудованием, использование полуколичественных методов анализов приводит к несопоставимости данных по качеству подземных вод за предыдущие годы. Применение единого методологического подхода к изучению природных и техногенных закономерностей формирования питьевых подземных вод необходимо для понимания механизмов трансформации качественного состава подземных вод и своевременного применения целенаправленных комплексных эффективных мероприятий по охране и рациональному использованию подземных вод. Поэтому, на современном этапе актуальной задачей является оценка природных и техногенных закономерностей формирования качества питьевых подземных вод для улучшения хозяйственно-питьевого водоснабжения, базирующаяся на передовых методах изучения, отображения, хранения, анализа и прогнозирования гидрогеологических материалов.

Использование материалов изучения качества пресных подземных вод, полученных при проведении поисково-разведочных работ на питьевые воды, существенно дополняет исследования предыдущих лет и позволяет уточнить значимость выявленных гидрогеохимических провинций с санитарно-гигиенических позиций в связи с оценкой обеспеченности населения страны кондиционными по своему качеству подземными водами.

В условиях антропогенного воздействия для применения мероприятий по охране и рациональному использованию подземных вод требуется более целенаправленное изучение качества подземных вод. В зонах влияния различных техногенных объектов (нефтебазы, нефтеперерабатывающие предприятия, нефтепромыслы, полигоны ТБО и промходов, городские очистные сооружения, предприятия теплоэнергетики и др.) необходимо определение приоритетных элементов загрязнения, обнаруживаемых в подземных водах. Сложившийся уровень антропогенного загрязнения является одной из основных причин, вызывающих деградацию депонирующих сред, приводящих к загрязнению подземных вод.

2. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Физико-географические условия

В гипсометрическом отношении поверхность рельефа в границах Томской области представляет собой плоскую относительно слаборасчлененную равнину с общим уклоном в северном направлении. Абсолютные отметки поверхности лежат в пределах 40 – 100 м по долинам крупных рек, увеличиваясь до 120 – 180 м на междуречных массивах. Максимальные отметки до 250 м приурочены к самому южному участку на площади отрогов Кузнецкого Алатау [23].

Обширные размеры территории на площади 316,9 тыс. км² определяют наличие зональности и специфики формирования ландшафтно-климатических условий. Большая часть территории расположена в зоне тайги. Согласно широтной зональности в направлении с юга на север выделяются подзоны: подтайги, южной и средней тайги, а на крайнем юге выделяется лесостепная зона (рисунок 4).

Климат характеризуется переходными условиями от умеренно к резко континентальному с высокой степенью увлажнения, благоприятно сказывающемся на возможности восполнения запасов подземных вод.

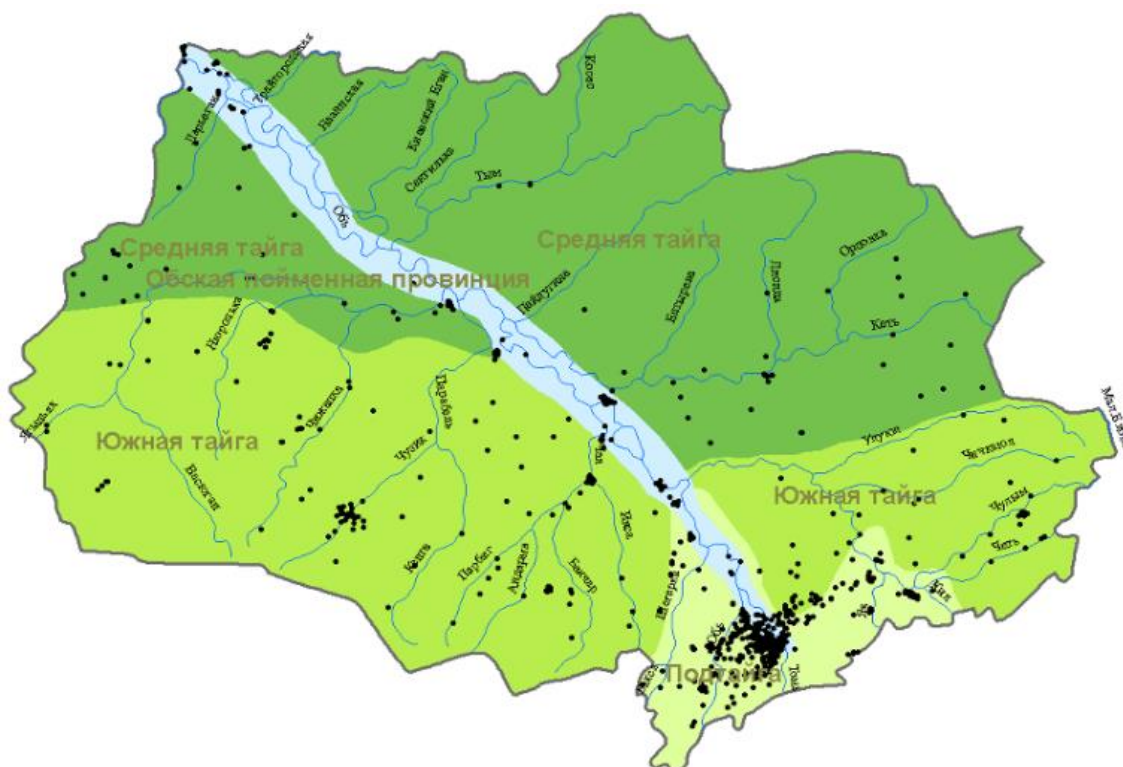


Рисунок – 4 Ландшафтные условия Томской области

Среднегодовая температура воздуха по разным оценкам в зависимости от длительности периода наблюдений и географического положения изменяется от $0,6\text{ C}^\circ$ на юге до $-3,5\text{ C}^\circ$ на севере. Суммарное количество атмосферных осадков существенно зависит от водности гидрологического года и от 400 до 570 мм и более. Избыточное по отношению к интенсивности испарения количество атмосферных осадков приводит переувлажнению территории. Это находит отражение в высокой степени заболоченности территории, которая на севере превышает 50%. Эта особенность ландшафтно-климатических находит отражение в распределении водных ресурсов, а при добыче подземных вод проявляется в особенностях эволюции химического состава при эксплуатации крупных водозаборов.

2.2. Геологическое строение

В геолого-структурном плане территория Томской области расположена на крайнем юго-востоке Западно-Сибирской плиты, а на юге граничит с отрогами Кузнецкого Алатау и структурами Колывань-Томской складчатой зоны [32].

Геологический разрез характеризуется трёхэтажным строением. Верхняя часть разреза представлена рыхлыми породами платформенного чехла, которыми сложен верхний структурный этаж. В строении фундамента выделяются средний и нижний структурные этажи. Формирование каждого этажа соответствует одному из трёх этапов тектогенеза: байкальско-салаирскому, герцинскому и мезозойскому [40].

Породы фундамента, представленные эффузивно-терригенными разностями докембрия и палеозоя, интенсивно дислоцированы и прорваны интрузиями.

Наиболее древние структуры относятся к байкалидам из состава Енисейской складчатой системы на севере области, образовавшиеся как результат результате дробления протерозойских складчатых систем.

Салаирские складчатые структуры представлены докембрийскими и ниже-палеозойскими метаморфическими комплексами. Фрагменты этих структур

образованы горстами, разделёнными впадинами, выполненными осадочными и вулканогенно-осадочными породами.

На этапе герцинского развития территории при нисходящих тектонических движениях земной коры накапливались, преимущественно, морские, прибрежно-морские, прибрежно-континентальные фации. Терригенные и вулканогенные породы девонского и каменноугольного возраста с угловым несогласием залегают на дислоцированном салаирском основании.

В составе отложений Кузнецко-Алатауской зоны преобладают карбонатные породы прибрежно-морских и морских фаций верхнего девона и нижне-каменноугольного возраста. Интрузивные образования зоны разнообразны по составу от гипербазитов до габброидов и микродиоритов.

Кольвань-Томская зона девон-каменноугольного возраста сложена вулканогенными и карбонатно-терригенными отложениями прибрежно-морских фаций Томского прогиба. Своеобразной особенностью этой толщи является наличие даек «томских диабазов», датируемых поздне-герцинским циклом тектогенеза и кварцево-жильная золотая минерализация, образующая россыпи золота, не имеющие промышленного значения.

К зонам гидротермального изменения терригенных толщ приурочена кварцево-жильная золотая минерализация и отдельные рудопроявления, дающие шлиховые потоки рассеяния и небольшие россыпи золота.

Формирование платформенного чехла на фоне погружения Западно-Сибирской плиты датируется мезозоем-кайнозоем и характеризуется накоплением толщ морских, прибрежно-морских, прибрежно-континентальных и континентальных фаций (рисунок 5).

Развитие структурного плана платформенного чехла обусловлено блоковым строением фундамента и, непосредственно, связано с тектоническими подвижками в его складчатых и блоковых структурах. На протяжении всего мезозоя и кайнозоя унаследовано развивались зоны триасовой рифтовой системы (грабен-рифты и межрифтовые поднятия), влияние которых сказалось на формировании в платформенном чехле мегажелобов и сводовых поднятий. Другие структуры

складчатого фундамента унаследовано отражаются в слоистом сложении чехла при заметном уменьшении амплитуды высот маркирующих горизонтов. Положительные формы рельефа повторяют очертания горстов, крупных сводов и выступов. Понижения поверхности маркируют грабены, впадины и прогибы [36].

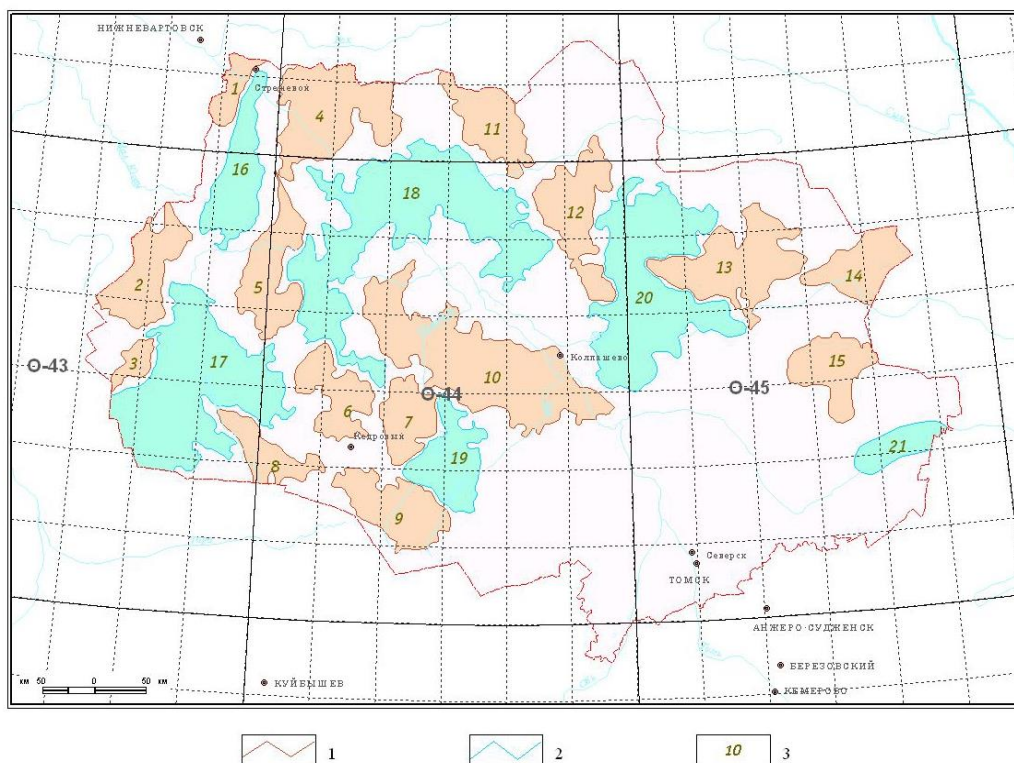


Рисунок – 5. Схема тектонического районирования платформенного чехла [36]

1 – Контуры положительных структур, 2 – Контуры отрицательных структур; 3 – Номера основных структур: 1 – Нижневартовский свод, 2 – Каймысовский свод, 3 – Крапивинско-Моисеевское куполовидное поднятие; 4 – Александровский свод, 5 – Среднеवासюганский мегавал, 6 – Пудинское мезоподняtie, 7 – Горелояровское мезоподняtie, 8 – Ларовский мезовыступ, 9 – Калгачский мезовыступ, 10 – Парабельский мегавыступ, 11 – Пыль-Караминский мегавал, 12 – Пайдугинский мегавал, 13 – Владимирский мегавыступ, 14 – Ярский мезовыступ, 15 – Степановское мезоподняtie, 16 – Колтогорский мезопрогиб, 17 – Нюрольская мегавпадина, 18 – Усть-Тымская мегавпадина, 19 – Бакчарская мезовпадина, 20 – Восточно-Пайдугинская мегавпадина, 21 – Тегульдетский мезопрогиб

Наиболее глубоководные зоны погружения плиты связаны с проявлениями рифтов в конце триасового периода (Колтогорский, Усть-Тымский, Чузикский), заложение которых привело к появлению ряда приподнятых блоков-поднятий (Нишневартовский, Каймысовский, Александровско-Васюганский, Пудинский).

Отмеченные особенности структурного плана геологического разреза имеют важное практическое значение с позиций планирования поисково-разведочных работ на углеводородное сырьё. К толще юрских отложений приурочена основная масса нефтегазоносных месторождений. В границах территории исследований выделяют Обь-Тазовскую и Обь-Иртышскую фациальные области. Обь-Тазовская фациальная область объединяет наиболее глубокие прогибы на северо-западе, сложенные морскими терригенными породами с повышенным содержанием органики. Обь-Иртышская фациальная область охватывает приподнятые участки палеорельефа на востоке, где преобладают угленосные континентальные фации.

Отложения меловой системы представлены морскими, прибрежно-морскими и континентальными литологическими разностями пород. Отмечается ритмичность осадкообразования, связанная с развитием морской регрессии, сопровождавшейся накоплением континентальных осадков, сменившейся масштабной трансгрессией в конце мелового периода. Породы морского генезиса занимают пространство к западу от г. Колпашево, а континентальные отложения, преимущественно, развиты восточнее с. Белый Яр. Между этими зонами развиты прибрежно-морские фации, характерные наличием скопления оолитовых железных руд.

Палеогеновая система представлена песчано-глинистыми отложениями палеоцена, эоцена и олигоцена. К отложениям эоцена, представленных глауконитовыми песчаниками, приурочен бакчарский горизонт осадочных железных руд, который вместе с нарымским и колпашевским железно-рудными горизонтами, образуют богатейшие Бакчарский, Колпашевский, Парабель-Чузикский и Парабельский рудные узлы.

В разрезе олигоцена преобладают аллювиальные и озерно-аллювиальные песчано-глинистые отложения, которые обогащены лигнитами и мощными

залежами бурых углей, имеющими промышленное значение. Отмечается значимые концентрации циркон-ильменитовой минерализации.

Четвертичные озерно-аллювиальные, озёрные и аллювиальные отложения имеют выраженные признаки тектонического поднятия Западно-Сибирской плиты в современных условиях. Приуроченность территории исследований к приледниковой зоне обусловила выраженную ритмичность осадконакопления, связанную с чередованием аллювиальных отложений, накапливающихся при таянии ледников, и, преимущественно, озёрных осадков, формирующихся при увеличении ледового покрова. В современных условиях на фоне тектонического поднятия прогрессируют процессы расчленения рельефа и формирования аллювиальных отложений.

2.3. Гидрогеологические условия

Результаты изучения гидрогеологических условий юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна основаны на значительном количестве фактического материала. Большой вклад в изучение гидрогеологии региона внесли М.И. Кучин, С.Г. Бейром, А.А. Розин, Е.В. Михайлова, В.М. Матусевич, Ю.К. Смоленцев, Н.Г. Гиринский, И.В. Гармонов, Б. П. Ставицкий, В.А. Нуднер, А.Д. Назаров, Н.А. Карлсон, Н.А. Ермашова, В.В. Кремер и многие другие.

Основная часть территории Томской области расположена на юго-востоке Западно-Сибирской плиты. Гидрогеологический разрез, представленный мезозойско-кайнозойскими отложениями, характеризуется двухэтажным строением. Верхняя и нижняя толщи отделены друг от друга непроницаемыми породами мел-палеогенового возраста, которые выполняют роль регионального водоупора [18].

Верхняя водоносная толща имеет слоистое строение и сложена чередованием песков, глин, алевроитов с прослоями гравийно-галечниковых отложений. Водовмещающие пород олигоцен-голоценового возраста создают благоприятные условия для формирования гидродинамической зоны активного водообмена в верхней части разреза, которая с нарастанием глубины переходит к условиям гидродинамической зоны замедленного водообмена. Основное питание подземные

воды верхнего структурного этажа получают в сезон положительных температур за счёт перехода в жидкую фазу снежных масс, накопленных в зимний период и летних атмосферных осадков. На водоразделах наблюдается переток вод из верхних водоносных горизонтов в нижние, в долинах рек – переток напорных вод из нижних горизонтов в верхние и русла рек. Разгрузка вод происходит в местные речные долины. Все фильтрационное пространство верхнего гидрогеологического этажа в плане мозаично разобцено гидродинамическими границами – реками-дренами на отдельные междуречные участки, в пределах которых потоки подземных вод направлены от водораздельной линии к рекам. В бассейнах стока, совпадающих с бассейнами рек, проходит вся короткая в геологическом смысле жизнь постоянно обновляющихся потоков подземных вод: здесь они активно участвуют в процессах выветривания, миграции и переотложения элементов, обеспечивая питание и устойчивый сток рек, восполнение эксплуатационных запасов подземных вод.

В пределах верхнего водоносного этажа развиты пресные и, значительно реже, слабоминерализованные подземные воды.

Нижняя водоносная толща, представлена разновозрастными песчано-глинистыми отложениями от триасовых до верхнемеловых. Отличительной особенностью нижнего этажа является большая мощность разреза, содержащего высоконапорные подземные воды. Восточное крыло бассейна (правобережье р. Оби) сложено, преимущественно, песчаными осадками, суммарная мощность которых от поверхности земли и до глубины 500-600 м составляет более 400 м. По данным нефтепоискового бурения, преимущественно, песчаный разрез в восточных районах области преобладает до глубины 1500-2000 м. Толща мезокайнозойского возраста сложена континентальными осадками. Последнее указывает на то, что геологические образования формировались в пресноводных водоемах и с момента их накопления, и до настоящего времени вмещают пресные, реже слабосолоноватые подземные воды.

В западных районах области (левобережье р. Оби) наблюдается смена континентальных фаций прибрежно-морскими и морскими. В западном и северо-

западном направлениях от р. Оби увеличивается глинистость разреза, что приводит к изоляции существующих водоносных горизонтов друг от друга и затрудненной связи обводненных подразделений по мере увеличения глубины их залегания. На Обь-Васюганском и Парабель-Васюганском междуречьях встречаются участки, где мощность песчаных отложений до глубины 400-500 м не превышает 10 м. Нижний водоносный этаж в западной части области характеризуется замедленным и весьма замедленным водообменом. Здесь, в силу закрытости разреза, сформировалась нефтегазоносная провинция с огромными ресурсами термальных и минеральных вод разнообразного состава и минерализации.

Региональный поток подземных вод нижнего водоносного этажа, направленный от области питания в краевой части бассейна к его центру, находится, как правило, вне сферы дренирующего влияния речной сети и воздействия современных физико-географических факторов. На отдельных участках разгрузка подземных вод происходит в долины крупных рек, контролирующих зоны разломов.

Для подземных вод нижнего водоносного этажа характерно закономерное повышение их температуры с увеличением глубины залегания и с удалением от палеозойского обрамления ЗСАБ.

Для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения на территории Томской области наиболее доступны ресурсы подземных вод, сосредоточенные, преимущественно, в толще водоносных комплексов верхнего этажа, где водовмещающие отложения представлены породами четвертичного, неогенового и палеогенового возраста. В значительно меньшей степени используются ресурсы подземных вод нижнего гидрогеологического этажа, которые ограничены только горизонтами мелового возраста. Учитывая сложность геологического строения и гидрогеологических условий, практическую значимость отдельных горизонтов с учетом стратиграфических границ, наличия выдержанных по площади глинистых толщ при региональной оценке эксплуатационных запасов подземных вод были выделены шесть основных водоносных комплексов, включающие сорок водоносных горизонтов.

Ниже приведена характеристика наиболее эксплуатируемых водоносных комплексов. Воды данных водоносных комплексов широко используются в хозяйственно-бытовых и промышленных целях. В процессе их эксплуатации возможно попадание их в болота, площадь развития которых в пределах Томской области обширна.

Водоносный комплекс неоген-четвертичный отложений. Залегает первым от поверхности рельефа и характеризуется повсеместным развитием практически на всей площади исследований. Водоносные отложения объединяют аллювиальные породы четвертичного возраста, пайдугинской, тобольской, смирновской, кочковской свит и миоцена. На крайнем юге мощность водоносных отложений резко снижается, где иногда приобретает островную форму.

Водовмещающие породы сложены песками с прослоями глин и суглинков, супесями и гравийно-галечниковыми отложениями. Фильтрационные свойства водовмещающих отложений характеризуются заметной изменчивостью как по простиранию, так и по глубине из-за их фациальной изменчивости. Коэффициенты фильтрации изменяются в широких пределах от 2 до 15,5 м/сут на междуречьях и от 1,9 до 47,6 м/сут в долинах рек. Соответственно, изменяется и водообильность отложений. Отмечается зависимость удельных дебитов скважин от их местоположения. В долинах рек фиксируются значения от сотых долей до 4 л/с, а на водоразделах размах значений удельных дебитов сокращается от 0,2 до 1,8 л/с.

Подземные воды в пределах пойм и низких террас безнапорные или слабонапорные при глинистом составе пород зоны аэрации. На высоких террасах и междуречных пространствах воды, в основном, напорные.

Состав вод отложений четвертично-неогенового возраста гидрокарбонатный кальциевый, кальциево-натриевый или магниевый-кальциевый с минерализацией от 0,02 до 0,65 г/дм³. Воды от очень мягких до жестких, величина общей жесткости изменяется от 0,2 до 8,5 мг-экв/дм³. Среда вод от слабокислой с рН – 6,2 до слабощелочной с рН – 8,48. В водах часто отмечается повышенное содержание общего железа.

Естественная защищенность вод неоген-четвертичных отложений от загрязнения с поверхности неодинакова, граница проходит по руслу р. Оби. На левобережье р. Оби защитные свойства разреза возрастают за счет залегания с поверхности слабопроницаемых отложений глинистого состава. На правобережье р. Оби естественная защищенность подземных вод как правило снижена за счёт наличия в кровле водоносных горизонтов относительно проницаемых отложений.

Воды неоген-четвертичных отложений используются для водоснабжения мелких потребителей в сельских населенных пунктах, где добываются посредством забивных скважин и колодцев.

Воды верхнего горизонта, имеющие, преимущественно грунтовый характер, находятся в тесной взаимосвязи с поверхностными водами - водотоками практически всех порядков. Воды имеют сезонное питание - в весенне-летне-осенний период. Оно обеспечивается инфильтрацией снеготалых вод в апреле-июле и дождевых осадков в течение летне-осеннего периода.

Водоносный комплекс отложений неоген-четвертичного возраста получает питание в основном за счёт инфильтрации атмосферных осадков. Области питания приурочены по большей части к возвышенным участкам плоских водоразделов и к склонам речных долин, разгрузка подземных вод осуществляется в речную сеть.

Интенсивная инфильтрация атмосферных осадков обеспечивается неглубоким залеганием вод от поверхности земли (особенно в долинах рек.) и достаточно высокими фильтрационными свойствами пород зоны аэрации. Накопление ресурсов происходит на всей площади развития горизонта, формируя поровые потоки подземных вод к многочисленным рекам и речкам, где они частично или полностью разгружаются.

Разгрузка происходит в виде родников в случае отсутствия в речной долине надпойменных террас или выпадения какой-либо террасы из её профиля. В этом случае поток имеет разорванный характер. Дебиты родников изменяются от 0,03 л/с до 0,5 л/с - в Александровском Приобье, до 0,02 л/с - в долине р. Васюган и до 0,33 л/с - в долине р. Нюрольки. Уклон подземного потока в этих случаях

значителен, обычно на порядок выше, чем в водораздельной части и измеряется уменьшением отметок, уровней на несколько метров на километр длины потока ($I=1-4 * 10^{-3}$).

Установлено, что на водораздельных пространствах уровни вод верхнего горизонта на 15 – 40 м выше вод нижележащего горизонта. Это обеспечивает частичное питание вод нижнего горизонта за счёт верхнего, однако, преимущество остаётся за инфильтрацией атмосферных осадков. Область транзита водных потоков является одновременно и областью их питания.

Водораздельный тип режима имеет наиболее стабильные характеристики, но также наблюдается чёткая зависимость изменения уровней от глубины их залегания и количеств атмосферных осадков. Амплитуда достигает одного метра.

В целом, для всех типов режима грунтовых вод характерен предвесенний спад с минимумом в конце зимы, весенне-летний максимальный подъём и незначительный осенне-зимний подъём. В приречной зоне подъём уровней, в основном, обеспечивается подпором речных вод. В направлении к внешним бортам и на водоразделах определяющими является состав зоны аэрации и интенсивность атмосферных осадков.

Водоносный горизонт, в целом, хорошо защищён от проникновения техногенного загрязнения с поверхности. Однако, степень защищённости заметно снижается на участках развития древних ложбин стока и речных долин, где мощность перекрывающих водоупоров заметно снижается или исчезает полностью.

Водоносный комплекс палеогеновых отложений является основным источником централизованного водоснабжения на территории Томской области. Водовмещающие породы представлены отложениями лагернотомской, новомихайловской, атлымской, юрковской, кусковской и тавдинской свит, сложенными толщей песков с прослоями алевроитов и характеризуются повсеместным распространением за исключением южных районов.

Гранулометрический состав водовмещающих пород изменяется в широких пределах. В западной части области преобладают мелкозернистые пески, среди

которых достаточно часто присутствуют и тонкозернистые разности. В центральной части пески разнотернистые, здесь наряду со средними встречаются крупные, иногда и грубые фракции. В восточной части значительную роль в составе комплекса играют крупно-груботернистые пески. Как правило, пески хорошо отмыты, иногда и отсортированы, местами встречается мелкий гравий. Вниз по разрезу зернистость песков увеличивается.

В соответствии с гранулометрическим составом песчаного материала изменяются и его фильтрационные свойства. Если на западе коэффициент фильтрации в среднем равен 5,4 м/сут, то по мере движения на восток величина его достигает 30 м/сут и более. В юго-восточном направлении, где пески менее промыты, коэффициент фильтрации снижается до 12-13 м/сут. Изменения фильтрационных свойств водовмещающих пород и их мощности определяют и величину коэффициента водопроницаемости, которая минимальна на западе (100–300 м²/сут) и юге области (200–500 м²/сут) и повышается до 2000–4000 м²/сут в ее центральных и северо-восточных частях. Основное питание подземных вод осуществляется за счёт атмосферных осадков, которое усиливается на участках уменьшения мощности водоупорных пород, залегающих в кровле, и в окраинных частях артезианского бассейна.

В кровле водоносный комплекс ограничен песчано-глинистыми отложениями лагернотомской или глинами новомихайловской свит. Породы подошвы представлены глинами и песками эоцена, иногда образованиями верхнемелового возраста.

Верхней границей комплекса служат песчано-глинистые отложения лагернотомской свиты или глины новомихайловской. В подошве залегают глинистые и песчаные образования эоцена или верхнего мела. Кровля водоносного комплекса залегает на различных глубинах, но имеет выраженную тенденцию к погружению в направлении с востока на запад, достигая максимальных глубин от 110 до 195 м. Мощность водонасыщенных пород достигает максимальных величин на северо-западе исследуемой территории и имеет исчезающе малые значения на крайнем юге.

Водоносный комплекс характеризуется напорным гидравлическим характером. Глубина пьезометрической поверхности достигает максимальных значений на водоразделах, где составляет 25 – 40 м, а в долинах крупных рек уменьшается до минимальных значений на уровне рельефа или образует области самоизлива с уровнем до 10 м выше рельефа.

Фильтрационные свойства водовмещающих пород можно охарактеризовать как относительно высокие, но заметно изменяющиеся как по площади, так и по разрезу, находясь в прямой зависимости состава водонасыщенных песков и степени их глинистости.

В прямой зависимости от фильтрационных свойств и мощности водовмещающих отложений находится и их водообильность. Коэффициент водопроницаемости существенно изменяется по пространству от максимальных значений, превышающих 2000 м²/сут на юге и в центре, до самых низких менее 200 м²/сут на востоке и юго-востоке. Дебиты скважин, в основном, составляют 15 - 25 л/с, иногда возрастают до 30 - 55 л/с при средней величине удельных дебитов от 1 до 3 л/с, иногда достигающей максимума 6,5 л/с.

Качественный состав вод повсеместно гидрокарбонатный. Соотношение катионов самое разнообразное. В южной части области преобладают кальциевые воды, в направлении на север доля кальция в составе вод уменьшается и появляются воды натриево-кальциевые, магниевые-кальциевые. Хлоридные кальциевые или натриевые воды с минерализацией от 0,7 до 1,2 г/дм³ отмечаются в отдельных скважинах на севере Обь-Томского междуречья. В юго-западной части Подгорненского месторождения подземных вод нижняя часть палеогенового водоносного комплекса содержит хлоридные натриевые, гидрокарбонатно-хлоридные кальциево-натриевые воды с минерализацией 1,2 – 2,8 г/дм³. Минерализация вод изменяется от 0,2 до 0,5 г/дм³, иногда достигая 0,7 - 0,8 г/дм³. Общая жесткость вод по площади изменяется от 0,2 до 6,9 мг-экв/дм³, рН – от 6,2 до 8,45. Повсеместно в водах отмечается повышенное содержание общего железа, марганца, низкое фтора.

По условиям защищенности от загрязнения с поверхности воды палеогеновых отложений относятся к категории защищенных, кроме участков, где отмечается отсутствие в их кровле глинистых отложений. Это обстоятельство имеет исключительную практическую значимость, поскольку подземные воды данного водоносного комплекса наиболее часто выступают основным источником организации надёжного централизованного водоснабжения населённых пунктов, включая г. Томск.

Гидрогеологической особенностью, района является гидравлическое единство вод верхнего гидрогеологического комплекса, в котором заключены все пресные воды. Наиболее тесная связь осуществляется между горизонтами четвертично-верхнеолигоценых образований. Практически, они являются единым водоносным комплексом с общими условиями питания, транзита, разгрузки и режима. Гидравлические водоразделы, а, следовательно, и основные области питания этих вод находятся на приподнятых водораздельных пространствах. Это междуречья Оби и Ваха, Оби и Тыма, Оби и Кети, Васюганское плато, природораздельная часть Обь-Иртышского междуречья.

Движение напорных подземных вод определяется дренирующим воздействием речных систем. Наиболее сильное влияние оказывает долина р. Оби, так как подземный сток с обоих берегов направлен к её руслу. Основное направление транзита нарушается дренирующим воздействием местной эрозионной сети. Конфигурация гидроизопьез, искривленная реками Васюган, Парабель, Ларь-Еган, Вах, Тым, Кеть, указывает на их роль в транзите вод образований палеогена. Уклоны пьезометрической поверхности к р. Оби составляет: 0,0005-0,007, а к левобережным притокам р. Оби - 0,00012-0,0025. Разгрузка осуществляется восходящим «потокком» на участках речных долин. Наиболее благоприятные условия разгрузки приурочены к местам глубокого размыва отложений четвертично-неогенового возраста и залегания песков палеогена под аллювиальными отложениями в долинах крупных рек.

Водоносный комплекс верхнемеловых отложений на территории исследований представлен толщами сымской и симоновской свит. Его характерной

особенностью является распространение на большей части территории, кроме крайнего юга. Подземные воды этого комплекса эксплуатируются на весьма ограниченной площади в пределах Асиновского, Первомайского и Зырянского административных районов Томской области.

В составе водовмещающих отложений преобладают разномерные пески, преимущественно, мелкозернистого гранулометрического состава с линзами глин и алевритов. Часто встречаются водонасыщенные пески с высоким содержанием глинистого материала, что снижает их водопроницаемость и водоотдачу. Наиболее выражена эта особенность в континентальных отложениях сымской свиты на территориях правого берега р. Оби. В этих условиях поисковым критерием для потенциальных месторождений подземных вод служит наличие линз хорошо отсортированных и промытых песков среди каолинизированной толщи.

Продуктивные горизонты водовмещающих пород залегают, в среднем, на глубинах от 80 до 140 м при максимальных значениях более 420 м в юго-восточных районах. При этом сильной изменчивости подвержена мощность водовмещающих пород, которая нарастает от первых метров до 200 м и более в направлении с юга на север.

Водоносный комплекс обладает высоконапорным гидравлическим характером с ростом напоров в направлении с юго-востока на северо-запад от 70 – 100 м до до 445 м.

Водообильность пород водоносного комплекса оценивается как низкая и связывается прежде всего с высокой степенью каолинизации глинистого материала песков. Удельные дебиты скважин, вскрывающих отложения сымской свиты в южной и центральной частях области, показывают крайне высокую изменчивость от 0,002 - 0,024 л/с до 0,1 - 0,5 л/с. Не отличается высокой степенью водообильности и отложения симоновской свиты. Характерные значения удельных дебитов скважин не превышают 0,08 - 0,1 л/с.

Водовмещающих отложений водоносного комплекса резко неоднородна по площади и изменяется в пределах от 3 – 12 м²/сут на юге до 600 – 900 м²/сут в более северных районах.

На правобережье р. Оби, в восточной и юго-восточной частях области, водоносный комплекс находится в зоне свободного водообмена. Питание его осуществляется, в основном, за счет атмосферных осадков. В связи с этим состав подземных вод близок к составу вод палеогеновых отложений. Воды гидрокарбонатные кальциевые, кальциево-натриевые, натриево-кальциевые, с минерализацией $0,1 - 0,28$ г/дм³, очень мягкие и мягкие (величина общей жесткости равна $0,3 - 2,6$ мг-экв/дм³), от нейтральных с рН – 6,4 до слабощелочных с рН – 8,2.

Большая часть левобережья территории находится в условиях затрудненного водообмена. Воды, содержащиеся в водоносных отложениях, имеют высокую минерализацию и газонасыщенность, повышенную концентрацию специфических компонентов, определяющих их как минеральные. Основная роль в питании водоносного комплекса принадлежит транзитному водоносному потоку из юго-западных областей. Состав вод гидрокарбонатный хлоридный и хлоридный натриевый с минерализацией от 1 до 12 г/дм³.

Воды протерозойско-палеозойских образований представляют практический интерес с позиций организации централизованного водоснабжения на крайнем юге Томской области, где мощность рыхлых пород чехла непостоянна и минимальна. Наиболее значительные запасы подземных вод приурочены к зоне экзогенной трещиноватости пород фундамента палеозойского возраста. Мощность развития открытой трещиноватости оценивается в пределах 100 – 115 м от подошвы мел-палеогеновой коры выветривания глинистых сланцев фундамента. Заметная роль в обводнении скальных пород принадлежит и зонам дробления, развивающимся по тектоническим нарушениям.

На трещиноватость экзогенного происхождения накладываются процессы тектонической нарушенности, приводящие к локализации подземных вод вдоль тектонических нарушений и сопутствующих им зон дроблений. Обводненность литифицированных пород, представленных песчаниками, глинистыми сланцами, аргиллитами и алевролитами в значительной степени зависит от степени их трещиноватости. Как правило, она выше в долинах рек и заметно снижается в направлении к вершинам водоразделов.

Уровни подземных вод, контролируемые положением пьезометрической поверхности, характеризуются большей глубиной залегания на водораздельных пространствах, достигающей 40 м. В долинах рек уровни подземных вод часто устанавливаются на уровне рельефа, иногда образуя участки с незначительным местным напором.

Водообильность отложений зоны экзогенной трещиноватости крайне неравномерна как по площади, так и по разрезу. Однако, до некоторой степени она подчиняется общей закономерности увеличения в направлении от водоразделов, где её характерные значения составляют 0,006 - 0,4 л/с, к долинам постоянно действующих водотоков, где удельные дебиты скважин возрастают до 3,83 л/с. Высокой водообильностью, как правило, отличаются участки контактов водовмещающих пород с дайками и тектоническими нарушениями.

По химическому составу подземные воды относятся к пресным с минерализацией в среднем 0,35 г/дм³, гидрокарбонатным смешанного (с преобладанием кальциевого) катионного состава. Среда воды изменяется от слабокислой до слабощелочной, средняя величина водородного показателя составляет 7,2. Воды прозрачные без запаха и вкуса, от мягких до очень жестких (общая жесткость изменяется от 2,9 до 11,8 мг-экв/дм³). Содержание общего железа, как правило, повышенное и изменяется в пределах от 0,3 до 30 мг/дм³.

Таким образом, вышеперечисленные условия определяющим образом влияют на формирование химического состава и качество подземных вод. Широтная ландшафтная зональность проявляется в составе подземных вод благодаря наличию потенциальной возможности появления вертикальных перетоков за счёт гидродинамической связи целевого водоносного комплекса с перекрывающими водоносными горизонтами. Одновременно с этими процессами состав вод формируется под влиянием литологических особенностей как, собственно водовмещающего комплекса, так и перекрывающих отложений.

3. ВОДОСНАБЖЕНИЕ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

По данным Управления Роспотребнадзора по Томской области водоснабжение подавляющего большинства населённых пунктов осуществляется за счёт использования 1049 источников водоснабжения. Это позволяет обеспечить водой питьевого качества до 95,3% населения. При этом основными источниками для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения являются подземные воды.

Общая численность населения Томской области превышает 1 млн. человек. По уровню бытового благоустройства большая часть жителей (до 74 %) приходится на население городов и посёлков городского типа (таблица 1, 2).

В балансе ресурсов подземных вод, используемых для функционирования систем водоснабжения, основная доля приходится на подземные воды водоносного комплекс палеогеновых отложений. Это объясняется не только широким распространением отложений палеогена на площади Западно-Сибирского артезианского бассейна, но и другими факторами. Среди них можно упомянуть высокие фильтрационные свойства, относительно небольшую глубину залегания водовмещающих отложений и высокую степень защищённости подземных вод от поверхностных источников загрязнения.

На долю водоносного комплекса палеогеновых отложений приходится наибольшее число разведанных месторождений подземных вод. В том числе на запасах подземных вод этих отложений организовано снабжение питьевой водой наиболее крупных населённых пунктов, таких как гг. Томск, Северск, Колпашево, Стрежевой. Практически, повсеместное распространение этих водоносных отложений доказало эффективность использования в качестве надёжного источника централизованного водоснабжения и для более мелких потребителей.

Оценка численности постоянного сельского населения Томской области
(начало 2022 г.)

Муниципальный район	Все население (человек)	в том числе:	
		городское население	сельское население
Александровский	7706	-	7706
Асиновский	33448	24442	9006
Бакчарский	11635	-	11635
Верхнекетский	15678	8324	7354
Зырянский	11122	-	11122
Каргасокский	18710	-	18710
Кожевниковский	20301	-	20301
Колпашевский	37148	22589	14559
Кривошеинский	11759	-	11759
Молчановский	12106	-	12106
Парабельский	12016	-	12016
Первомайский	16331	-	16331
Тегульдетский	6033	-	6033
Томский	81181	-	81181
Чаинский	11418	-	11418
Шегарский	19004	-	19004

Таблица 2

Оценка численности постоянного городского населения Томской области
(начало 2022 г.)

Город	Все население (человек)	население	
		городское население	сельское население
Городской округ "Город Томск"	589701	568508	21193
Городской округ "Город Стрежевой"	39903	39903	-
Городской округ "Город Северск"	112143	105858	6285

Продолжение таблицы 2

Город	Все население (человек)	население	
		городское население	сельское население
Городской округ "Город Кедровый"	2938	1886	1052
г. Асино	24442	24442	-
г. Колпашево	22589	22589	-

Однако, в южной части территории исследований на площади Колывань-Томской складчатой зоны палеогеновые отложения, практически, отсутствуют. Здесь вынужденно эксплуатируются подземные воды комплекса палеозойских образований, несмотря на их невысокую водообильность и пониженную степень защиты от проникновения поверхностных загрязнений. Выраженная пространственная неравномерность относительно низкой степени водообильности водовмещающих пород приводит к очевидному росту затрат на проведение поисково-разведочных работ на подземные воды.

По состоянию на 2021 г. на территории Томской области, согласно данным ООО «Томскгеомониторинг», действуют 386 водозаборов из подземных источников (таблица 3).

Таблица 3

Количество водозаборов, эксплуатирующих разновозрастные водоносные комплексы, и их суточная производительность на 2021 г.

Водоносный комплекс (горизонт)	Количество водозаборов	Водоотбор, тыс. м ³ /сут
Неоген-четвертичный	25	0,8
Палеогеновый	245	187,7
Меловой	6	0,364
Палеозойский	110	41,54

В целом, на территории Томской области общая сумма оцененных запасов подземных вод по категориям А+В+С₁+С₂ составляет 822,7 тыс. м³/сут в границах

143-х месторождений и водозаборных участков. Из них в эксплуатацию вовлечен 91 объект, что составляет 64% от их общего количества (таблица 4).

На территории Томской области по состоянию на начало 2022 г. зарегистрировано 386 недропользователей, эксплуатирующих запасы подземных вод. К их числу относятся как самые крупные предприятия специализированного назначения, к которым относятся такие предприятия как ООО «Томскводоканал» или «Стрежевойводоканал», так и более мелкие организации, производственная деятельность которых связана непосредственно с водоснабжением домов отдыха, пионерских лагерей, отдельных промышленных производств и т.д.

Таблица 4

Сводные данные о запасах питьевых и технических подземных вод на территории Томской области

Административная единица	Запасы подземных вод, тыс. м ³ /сут					Количество месторождений (участков) подземных вод	
	всего	по категориям				всего	в том числе в эксплуатации
		A	B	C ₁	C ₂		
г. Стрежевой	60,0	39,2	20,8	0,0	0,0	2	2
Александровский район	3,5	0,0	0,8	1,7	1,0	16	10
Асиновский район	38,9	0,0	26,1	12,8	0,0	1	1
Бакчарский район	7,5	0,0	7,5	0,0	0,0	1	0
Верхнекетский район	30,0	0,0	20,3	9,7	0,0	1	0
Зырянский район	20,0	0,0	13,0	7,0	0,0	1	0
Каргасокский район	6,1	0,0	2,5	3,6	0,0	27	21
Кожевниковский район	15,0	0,0	15,0	0,0	0,0	2	0
Колпашевский район	6,2	0,0	0,2	0,0	6,0	3	2
Кривошеинский район	33,0	7,5	13,5	12,0	0,0	1	0
Молчановский район	31,6	0,0	17,5	14,1	0,0	3	2
Парабельский район	2,4	0,0	1,1	1,3	0,0	17	12
г. Кедровый	43,4	0,0	29,4	14,0	0,0	1	0
Первомайский район	25,0	0,0	15,0	10,0	0,0	1	0

Продолжение таблицы 4

Административная единица	Запасы подземных вод, тыс. м ³ /сут				Количество месторождений (участков) подземных вод		
	всего	по категориям				всего	в том числе в эксплуатации
		А	В	С ₁	С ₂		
Тегульдетский район	20,0	0,0	20,0	0,0	0,0	1	0
Томский район	39,5	6,3	13,7	12,2	7,4	32	21
г. Томск	298,2	261,5	15,3	21,3	0,0	16	14
г. Северск	93,1	50,6	39,4	3,1	0,0	5	4
Чаинский район	22,8	0,0	15,0	7,8	0,0	2	1
Шегарский район	26,4	0,0	15,0	11,4	0,0	10	1
Итого	822,7	365,1	301,1	142,2	14,3	143	91

На сегодняшний день на территории Томской области находится в полной или частичной работе более 3000 водозаборных скважин. Производительность этих одиночных и групповых водозаборов меняется в весьма широких пределах от 10 м³/сут до 125 тыс. м³/сут как на крупнейшем Томском водозаборе.

Суммарное количество подземных вод, добываемое для нужд населения Томской области, за последнее время достигло весьма внушительных масштабов, превышающих суммарный дебит в 238 тыс. м³/сут. Однако, использование водных ресурсов населением существенно неравномерно и в значительной степени является функцией степени благоустройства освоенных территории (таблица 5, 6). На долю городского населения приходится 141 ÷ 280 л/сут на одного человека при среднем водопотреблении 221 л/сут. По средним оценкам для территории России потребление воды по расчётам на одного жителя составляет 250 л/сут.

На долю сельского населения Томской области приходится 101,9 л/сут, что в расчёте на одного жителя составляет только 41% от средней обеспеченности городского населения (таблица 5, 6).

Таблица 5

Потребление воды городским населением Томской области

Населенный пункт	Количество водозаборов	Водопотребление, тыс. м ³ /сут	Население, тыс. человек	Водопотребление на одного человека, л/сут
г. Томск	86	153,4	568,5	269,8
г. Северск	6	29,6	105,9	280,1
г. Стрежевой	7	10,8	39,9	270,3
г. Асино	5	4,5	24,4	184,9
г. Колпашево	2	3,2	22,6	141,4
г. Кедровый	2	0,3	1,9	179,7

Таблица 6

Потребление воды сельским населением Томской области

Население административного района, тыс. чел.		Количество водозаборов	Водоотбор, тыс. м ³ /сут	На 1 водозабор	Водопотребление на 1 человека, л/сут.
Александровский	7,7	22	1,1	0,05	144,6
Асиновский	9,0	15	0,7	0,04	72,5
Бакчарский	11,6	9	0,4	0,05	32,7
Верхнекетский	7,4	7	0,6	0,08	77,0
Зырянский	11,1	7	1,1	0,16	97,7
Каргасокский	18,7	46	2,3	0,05	121,1
Кожевниковский	20,3	18	3,2	0,18	159,3
Колпашевский	14,6	7	3,9	0,55	214,5
Кривошеинский	11,8	9	1,2	0,13	98,8
Молчановский	12,1	6	0,6	0,11	50,2
Парабельский	12,0	26	1,4	0,05	115,2
Первомайский	16,3	12	1,3	0,11	80,5
Тегульдетский	6,0	1	0,0	0,05	8,0
Томский	81,2	74	15,3	0,21	187,2
Чаинский	11,4	8	0,7	0,09	65,6
Шегарский	19,0	12	2,1	0,17	104,8
Томская область	298,8	285	40,5	0,14	128,9

Этот показатель не является постоянным и существенно изменяется от одного административного района к другому. Так для жителей Колпашевского района водопотребление достигает почти 215 л/сут, а для населения Тегульдетского района этот показатель сокращается более чем в 25 раз, достигая значения до 8 л/сут. Однако, следует иметь ввиду, что приведённые цифры могут иметь весьма ориентировочную оценку, поскольку опираются на материалы строгой отчётности. При этом в сельской местности значительная часть жителей имеет неучтенные индивидуальные источники водоснабжения [81].

Наиболее часто встречающаяся производительность водозаборов (как правило одиночных) за пределами городских территорий лежит в пределах от 0,05 до 0,33 тыс. м³/сут. При этом средняя производительность гидрогеологических скважин. изменяясь от 0,02 до 0,093 тыс. м³/сут, оценивается величиной 0,045 тыс. м³/сут.

Динамика изменения интенсивности водоотбора из подземных источников, характерная для подавляющего большинства потребителей области, наиболее наглядно представлена в результате анализа временных рядов наблюдений на примере выбранных нами крупных водозаборов (по данным ООО «Томскгеомониторинг») (рисунок 6 – 10). Общая тенденция к снижению объема добычи подземных вод хорошо и наглядно демонстрирует процессы оптимизации технологических и технических схем водоснабжения и совершенствование систем за его контролем.

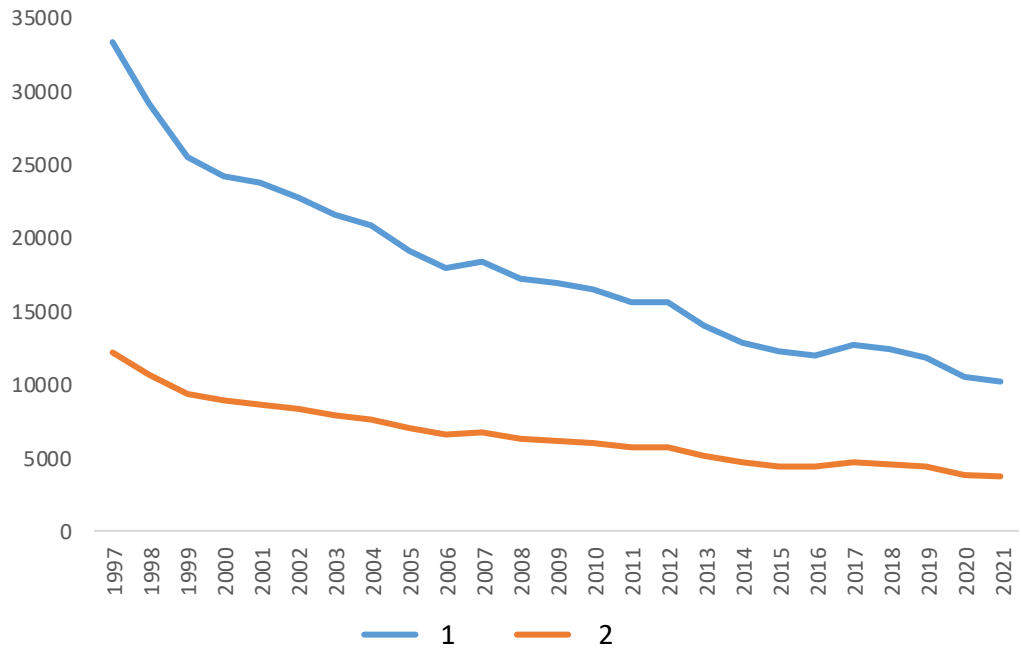


Рисунок – 6 Динамика изменения водоотбора водозабора г. Стрежевой:
1 – м³/сут, 2 – тыс. м³/год;

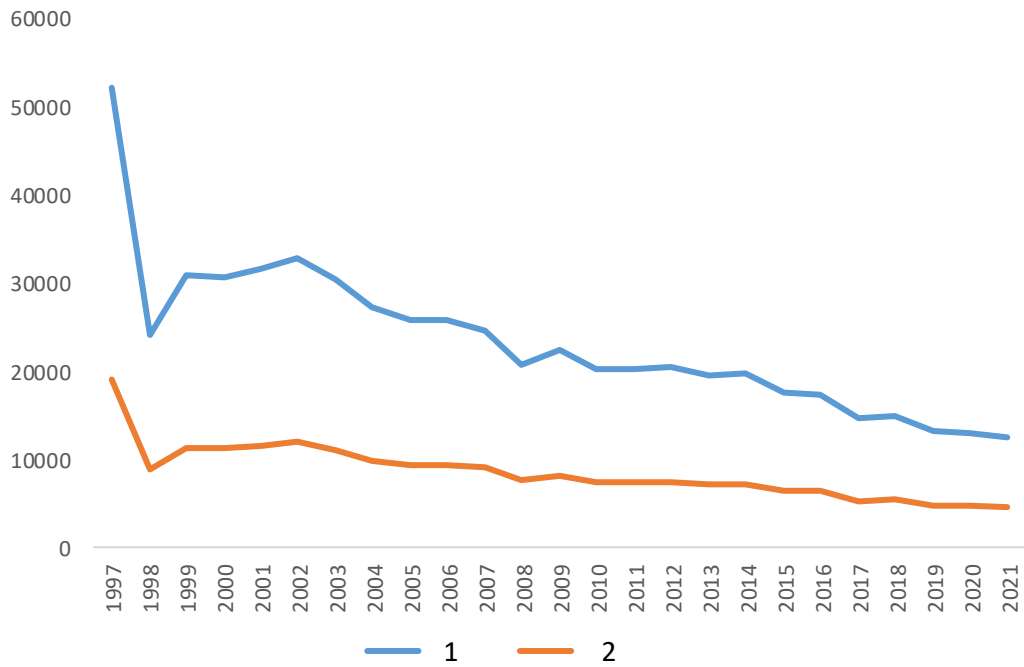
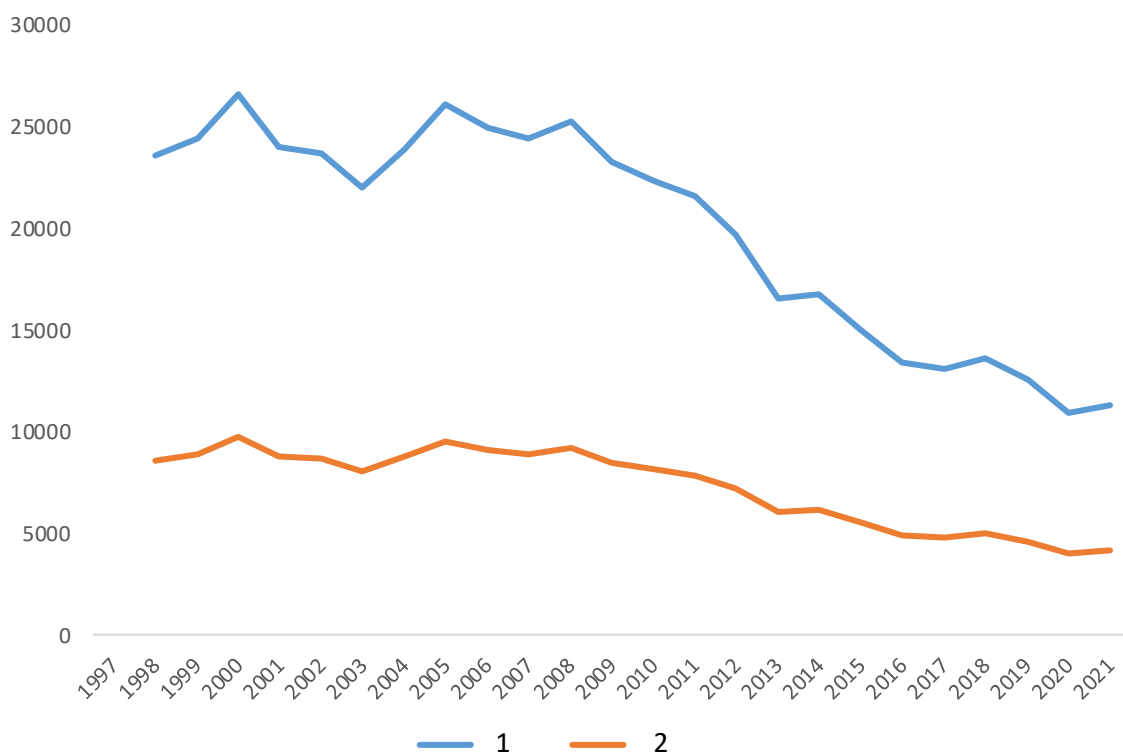
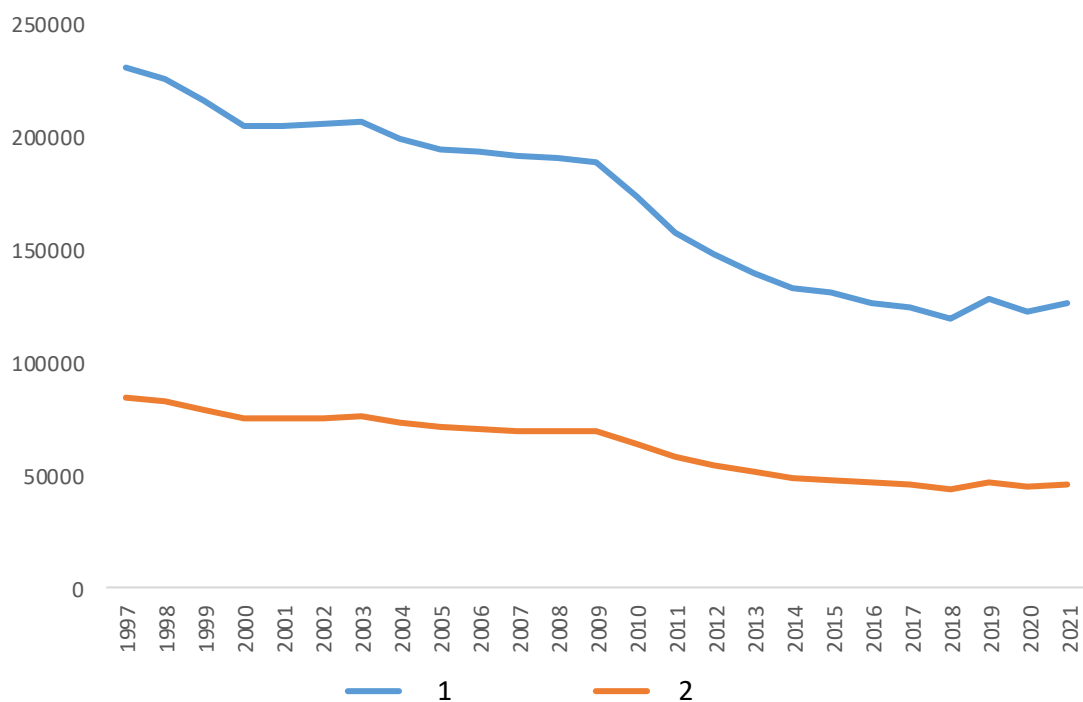


Рисунок – 7 Динамика изменения водоотбора водозабора № 1 г. Северск:
1 – м³/сут, 2 – тыс. м³/год;



Рисунок– 8 Динамика изменения водоотбора водозабора №2 г. Северск:

1 – м³/сут, 2 – тыс. м³/год;



Рисунок– 9 Динамика изменения водоотбора водозабора г. Томск:

1 – м³/сут, 2 – тыс. м³/год;

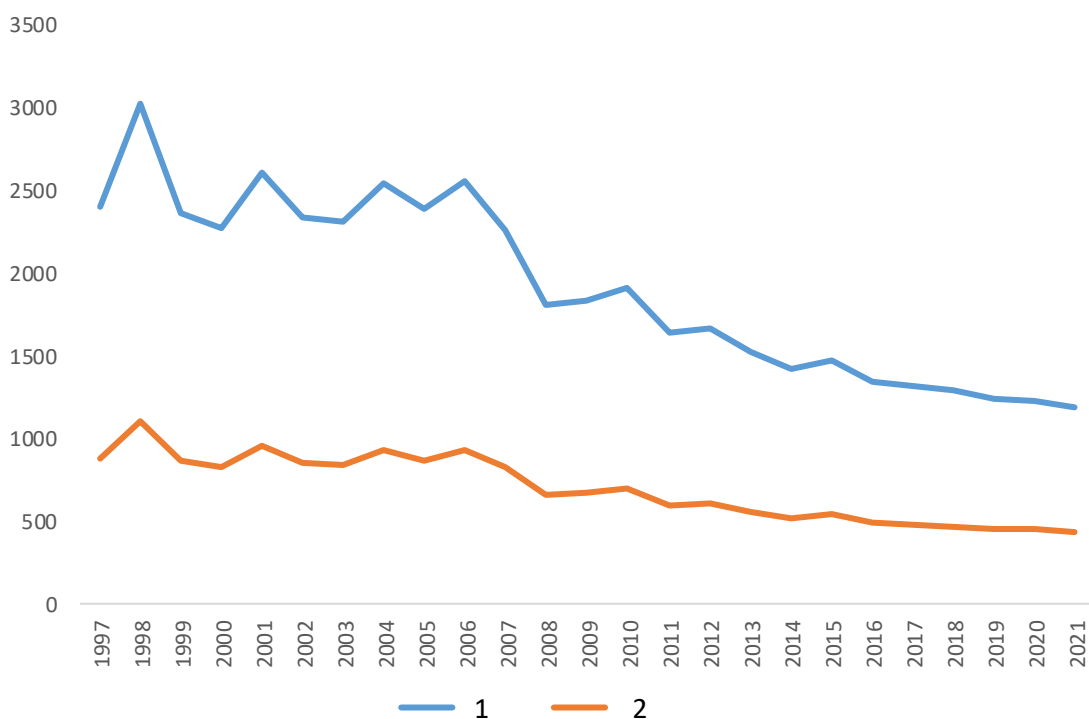


Рисунок – 10 Динамика изменения водоотбора водозабора микрорайона Академгородок (г. Томск): 1 – м³/сут, 2 – тыс. м³/год;

Отмеченные тенденции нельзя связывать с отрицательной динамикой населения Томской области. Ориентировочные данные по численности населения из доступных источников (рисунок 11) показывают, что прямая корреляция между изменением водоотбора и численностью населения отсутствует. Несмотря на явную условность надёжности такого сопоставления, отметим, что на рисунках 6 – 10 представлены водозаборы крупных городов, население которых в наибольшей степени подвержено процессам миграции.

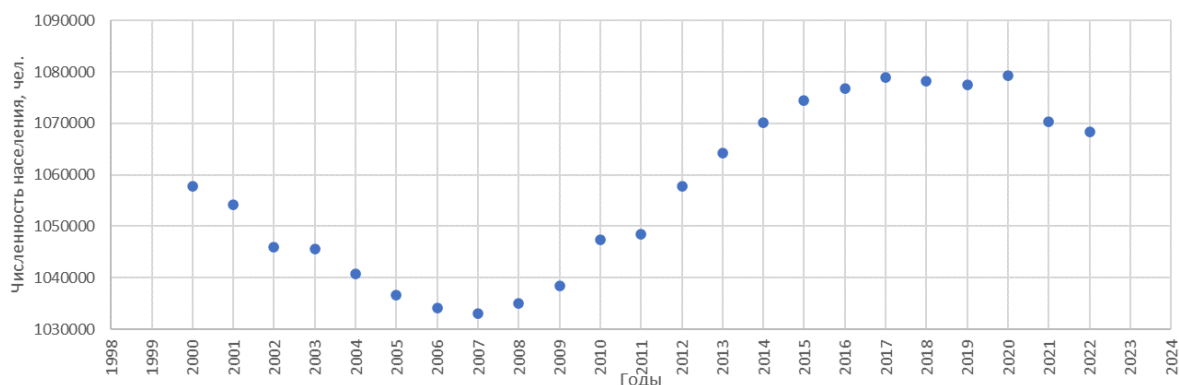


Рисунок – 11 Динамика изменения численности населения Томской области

Считаем, что упомянутые нами процессы оптимизации технологических и технических схем водоснабжения могут объясняться, в том числе, и внедрением мероприятий, предусмотренных программой регионального проекта «Чистая вода», направленного на повышение качества питьевой воды для населения Томской области.

Снижение водоотбора отмечается с середины 90-х годов и продолжается по сей день. Темпы снижения не одинаковы по объектам, однако, в каждом случае достаточно равномерны по времени. Для водозабора г. Стрежевой снижение составило 23150,7 м³/сут в период с 1997 по 2021 г.г. с 33300 до 10120 м³/сут, что в 3,3 раза меньше исходного количества.

Для северских водозаборов отмечается сначала резкое, в течении нескольких лет в начальном периоде приведенного ряда наблюдения, а затем достаточно плавное снижение водоотбора с самым значительным (водозабор № 1), относительно начального объема, сокращением более чем в четыре раза добычи подземных вод с исходных 52100 до 12500 м³/сут. Для второго водозабора падение объемов добываемой воды было не столь значительным и составило 12200 м³/сут с 23500 до 11300 м³/сут.

Плавным снижением объемов добычи подземных вод характерен ряд наблюдений за производительностью Томского городского водозабора. В течение аналогичного периода с 1997 по 2021 г.г. оно составило самую большую в абсолютном выражении величину 105000 м³/сут, среди исследуемых объектов. Исходная добыча в начале исследуемого периода составляла 230400 м³/сут, а на начало 2022 года эта величина сократилась до 126000 м³/сут. Ежегодное среднее снижение составило 4360 м³/сут.

Подобная тенденция характерна и для водозабора микрорайона Академгородока в г. Томске. За период наблюдения снижение водоотбора составило 1220 м³/сут. Исходная производительность за период наблюдения сократилась с 2400 до 1187 м³/сут.

На основе анализа интенсивности водоотбора с учетом природных факторов формирования состава подземных вод, описанных в главе 2, в наших

исследованиях минимизировано количество водозаборов подземных вод, эксплуатирующихся на территории Томской области в типовых условиях.

Объектами исследования стали водозаборы Томского месторождения подземных вод, микрорайона Академгородка, городских водозаборов Северска и Стрежевого. Выбор этих объектов в качестве типовых обусловлен достаточно выраженным влиянием основных естественно-природных и техногенных факторов, которые определяют качество и геохимические особенности подземных вод хозяйственно-питьевого назначения района исследования.

Широтная ландшафтно-климатическая зональность и вертикальная гидрогеохимическая зональность, отмеченная ранними исследованиями и типичная для исследуемого района; характер водовмещающих отложений, влияющий на состав подземных вод; литологический состав перекрывающих отложений, играющий крайне важную роль в характере водообмена системы и выполняющий защитную роль; геологическое строение толщи, обуславливающее возможность подтягивания некондиционных вод из нижележащих водоносных горизонтов, имеющих резко отличный геохимический облик - все эти проявления четко и ясно фиксируются в результатах мониторинговых наблюдений указанных водозаборов.

Кроме того, достаточно полные, как по времени, так и по параметрам ряды наблюдения за параметрами подземных вод водозаборов дают достаточно четкое представление о характере влияния активной эксплуатации на геохимический состав, направление и динамику этих изменений и дает возможность выявить механизмы, объясняющие возникающие эффекты при длительной работе водозаборов.

Так, типичной ситуацией для территории исследования является аэрация недр за счет снижения уровня подземных вод в результате формирования воронок депрессии, что в одних геологических и гидрогеологических условиях приводит к интенсификации перехода переменного-валентных элементов из раствора в твердую фазу (выпадение из раствора), в других же геолого-гидрогеологических условиях аэрация приводит к окислению пирита, что запускает ряд геохимически

взаимосвязанных процессов, ухудшающих качество вод. Для обширных пространств развития болотных массивов наряду с аэрацией возможно проникновение в продуктивный горизонт поверхностных вод контрастного типа в объемах достаточных, чтобы определить смену геохимической обстановки, способствующей ухудшению качества при эксплуатации подземных вод.

Помимо этого, активная работа водозабора может привести к проникновению поверхностного загрязнения, выражающегося в повышении концентраций хлора, сульфат-иона и росту объемов патогенной микрофлоры.

Активная эксплуатация водозаборов может способствовать активизации процессов перетока подземных вод отличающегося качества из ниже залегающих водоносных горизонтов в районах, где природные условия (характер геологического строения, структура фильтрационного потока и т.д.) этому способствуют.

Результаты анализа условий эксплуатации подземных вод показывают, что факторы формирования их состава поддаются количественной оценке. Например, применение методики численного моделирования позволяет не только прогнозировать количественные параметры перспективного водоотбора, но и путем решения прогнозных геомиграционных задач, оценивать перспективы ожидаемого изменения качества подземных вод. Нами показано, что в условиях широкого развития заболоченных территорий интенсивная эксплуатация подземных вод может вызывать резкое изменение гидрогеохимической обстановки решительным образом влияя на миграционную способность ионов железа. Те же процессы интенсификации водоотбора при эксплуатации месторождений подземных вод палеозойских отложений (при малой мощности перекрывающих отложений чехла) могут существенно изменять концентрации сульфат-иона. Наличие подобных процессов мы посчитали необходимым отразить в классификация основных факторов формирования подземных вод питьевого назначения (рисунок 12).

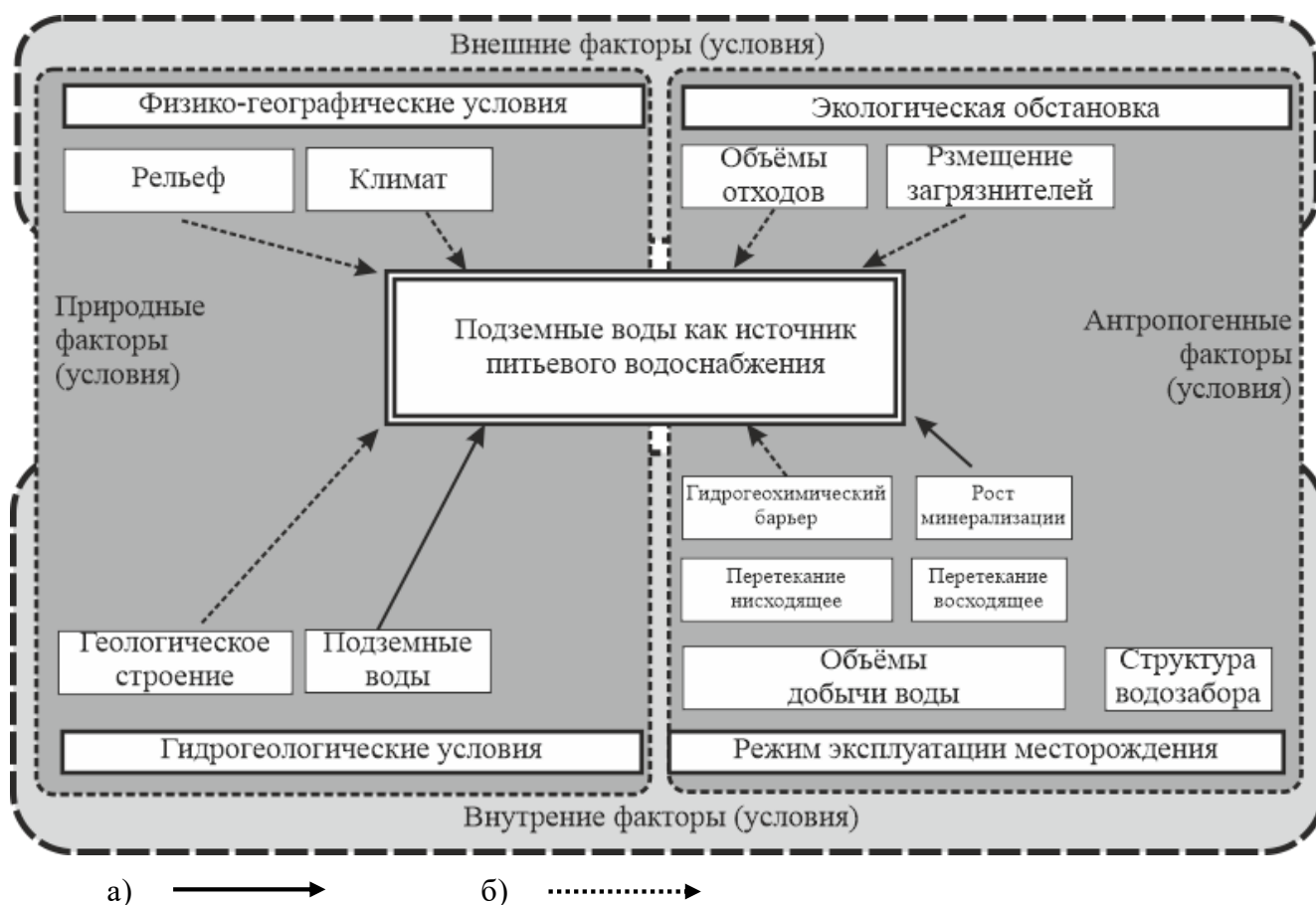


Рисунок – 12 Классификация основных факторов (условий) формирования подземных вод питьевого назначения (по В.А. Зуеву с добавлениями):

а – прямой, б – непрямой характер действия факторов

Кроме того, практика эксплуатации крупных водозаборов показывает, что при этом сохраняется риск ухудшения качества подземных вод и за счёт подтягивания солоноватых вод из нижележащих отложений мелового возраста. В региональном плане опасные в этом отношении участки выявлены нами с использованием методики морфоструктурно-гидрогеологического анализ. Он показал, что на отдельных участках речных долин (глава 5) существует повышенная вероятность проявления потенциальной возможности разгрузки подземных вод меловых отложений повышенной минерализации.

4. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для характеристики природных ландшафтно-климатических, геологических, гидрогеологических условий территории и особенностей организации водоснабжения населения Томской области, характеристики гидрогеологических условий районов выбранных типовых эксплуатируемых месторождений подземных вод, обобщения данных гидрогеохимических региональных и детальны́х исследований на выбранных типовых эксплуатируемых месторождениях подземных вод, уточнения известных ранее и выявления новых региональных закономерностей изменчивости химического состава подземных вод, использующихся для водоснабжения населения района исследований, оценки особенностей изменения состава и качества подземных вод ряда эксплуатируемых месторождений подземных вод были применены следующие подходы к обработке исходной гидрогеологической информации [42,69]:

- оценка исходных данных факторов формирования химического состава и собственно химического состава подземных вод как точечного, так и непрерывного в плане распространения;
- получение прогнозных гидрогеологических данных по результатам гидродинамического моделирования;
- получение прогнозных гидрогеологических данных по результатам морфоструктурно-гидродинамического анализа;

4.1. Подготовка исходных данных химического состава подземных вод для картографических построений и анализа региональных закономерностей

4.1.1. Подготовка информационной таблицы гидрогеологического содержания

Перед выполнением анализа гидрогеохимической информации возникает необходимость тщательной выборки исходного материала. Исходная база гидрогеологических данных, представленная в виде единой информационной таблицы, содержит большое число записей, соответствующее разовым наблюдениям химического состава подземных вод. По каждому объекту (скважине) набор наблюдений сильно различен: от одиночных замеров,

производившихся при бурении скважины, её ремонта, актуализации документации до довольно полного ряда наблюдений в течении десятков лет. В силу различных причин в содержании информационной таблицы имеет место непостоянный и, зачастую, недостаточный набор наблюдаемых компонентов. Имеются дубли записей, содержащих отдельно информацию о макро- или микрокомпонентном составе подземных вод. В отдельных случаях отсутствует какая-либо информация о географической привязке точки наблюдения. Отсутствуют либо имеют место ошибки в номерах точек опробования. Ошибки в порядке числовой записи содержания химических компонентов или значений показателей химического состава подземных вод.

Все вышеперечисленные условия потребовали выработки последовательного многоступенчатого сценария отбора записей, входящих в итоговую информационную таблицу, служащей основой анализа пространственного характера гидрогеохимических показателей.

Первая ступень: отбор записей, включающих полный макрокомпонентный химический состав пробы.

Вторая ступень: отбор записей, включающих наиболее полный микрокомпонентный химический состав пробы.

Третья ступень: отбор записей, прошедших проверку на электронейтральность.

Четвертая ступень: отбор записи соответствующего пункта наблюдения, содержащей позднейшую дату отбора пробы или проведения химического анализа.

Реализация сценария выполняется средствами табличного процессора MS Excel, либо составлением соответствующего запроса непосредственно к исходной базе данных.

Результатом реализации сценария формирования итоговой информационной таблицы стали 1236 пункта наблюдения химического состава подземных вод для палеогенового и 193 пункта для мелового водоносных комплексов.

4.1.2 Подготовка и актуализация картографического материала.

Для совместного использования разнородной картографической информации, картографических построений, анализа и пространственной визуализации геологической информации удобно применение географических информационных систем. В частности, геоинформационного продукта ArcGis компании ESRI (Environmental Systems Research Institute) с использованием которого реализована часть аналитической обработки исходного материала и выполнена визуализация результатов статистической обработки гидрогеохимической информации.

Важной задачей при использовании электронного картографического материала, в особенности, совместного использования векторных и растровых данных, является выбор системы координат проекции. Такая процедура выполняется путем назначения виду окна данных спроектированной системы координат рабочего набора ArcGis (data frame properties/coordinate systems). После назначения координатной системы пространству отображения, любая информация, имеющая данные о географической координатной системе будет отображаться корректно.

Параллельно выполняется назначение географической системы координат векторным слоям, не имеющим таковой. Выполняется перепроектировка координатных систем слоев, имеющих таковую, но не совпадающих с основной. При необходимости, выполняется корректировка параметров имеющихся координатных систем векторных слоев. Эти операции осуществляются средствами набора инструментов Projections and Transformations. Помещенные в рабочий набор ArcGis, имеющие установленную географическую координатную систему векторные слои готовы к их дальнейшему использованию.

Работа с картографическим материалом на бумажных носителях имеет следующую последовательность:

- 1) Получение растровой информации необходимого качества путем сканирования изображения.

- 2) При необходимости, коррекция и сшивка сканированных фрагментов изображения.
- 3) Передача растрового изображения в программу ГИС.
- 4) При необходимости, предварительная трансформация растрового изображения.
- 5) Пространственная привязка растрового изображения к векторному слою топографической основы путем совмещения опорных точек привязки.
- б) Оцифровка растрового изображения

После трансформации растрового изображения появляется возможность добавлять к рабочему набору растровый слой, имеющий пространственную привязку и не требующий предварительных манипуляций для его использования.

Оцифровка растрового изображения заключается в автоматическом, полуавтоматическом или ручном режиме переноса соответствующей информации точечного, линейного или полигонального типа в специализированный векторный слой. При этом информация об оцифрованном объекте заносится в атрибутивную таблицу векторного слоя.

Растровые изображения, полученные на основе векторных данных, подготовленных в соответствии с вышеизложенным наследуют все преобразования векторной информации и в дополнительной подготовке не нуждаются.

Растровые данные SRTM являются полноценным растровым изображением, требующим лишь сшивки отдельных фрагментов.

4.2. Методика гидродинамического моделирования

В нашей работе гидродинамическое моделирование использовано как стандартная технология прогноза изменения гидрогеологических условий под влиянием техногенного воздействия, рекомендованная к применению нормативными документами (например: «Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод») для подсчёта запасов подземных вод в сложных гидрогеологических условиях [91]. С учетом того, что к основным факторам, влияющим на качество подземных вод при их эксплуатации, относится возможность проявления эффекта перетекания из смежных с эксплуатационным водоносных горизонтов, следует считать

применение методов гидродинамического моделирования вполне оправданным [10, 94]. В современных условиях наиболее технологичные приемы гидрогеологического моделирования связаны с применением средств вычислительной техники для реализации прогнозных задач на основе решения базовых дифференциальных уравнений геофильтрации. В последнее время, наибольшей популярностью пользуются несколько версий решающего модуля *Modflow*, который используется в таких пакетах прикладных программ как *Processing Modflow (PMWIN)*, *Visual MODFLOW (VMOD)*, *ModelMuse (MM)* и *Groundwater Modeling System (GMS)*.

Теоретическая основа численного моделирования в этих программных комплексах строится на решении общего дифференциального уравнения нестационарной фильтрации с наличием внутренних и внешних граничных условий по методу конечных разностей:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + w = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4.2.1)$$

где x, y, z – координаты в пространстве;

$H = H(x, y, z, t)$ – напор подземных вод в пласте, м;

K_x, K_y, K_z – коэффициент фильтрации по соответствующим осям, м/сут;

$w = w(x, y, z, t, H)$ – интенсивность источников-стоков;

t – время, сут;

μ – водоотдача.

Технически процесс решения этим методом реализуется путем перехода от дифференциального представления переменных, описывающих процесс фильтрации, к системе алгебраических уравнений балансовых составляющих фильтрационного потока на пространстве конечно-разностной сетки области. Таким образом, при схематизации гидрогеологических условий формируется сеточное представление водовмещающей толщи, которая может включать несколько расчётных слоёв, представленных массивом расчётных ячеек. Каждая ячейка является однородной по фильтрационным свойствам и условно содержит всю воду в центре расчётного блока (в узловой точке блока). Согласно сеточному

представлению водоносного горизонта движение подземных вод осуществляется от одного расчётного блока к другому (соседнему), испытывая фильтрационное сопротивление, которое поддаётся количественной оценке на основе фундаментальной зависимости закона Дарси. Пространственная и временная дискретизация области фильтрации обеспечивает возможность учёта как пространственной неоднородности фильтрационных свойств, так и нестационарного характера фильтрационных потоков. На пространстве конечно-разностной сетки составляется балансовое уравнение для каждого узла всех расчётных блоков. Таким образом формируется система линейных конечно-разностных уравнений, которая решается методом сопряженных градиентов (рисунок 13).

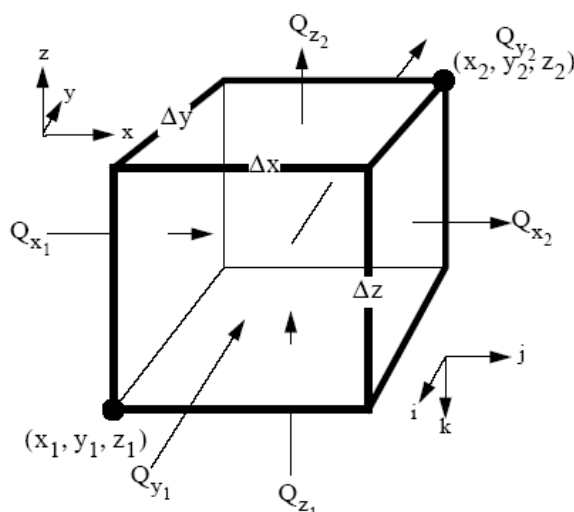


Рисунок – 13 Конечно-разностная ячейка и компоненты баланса расхода семиточечного вычислительного шаблона многослойной гидродинамической модели

Изменение величины водопроницаемости пласта между узлами учитывается в ее осредненной величине, так что:

$$\frac{\partial}{\partial x} T_x \approx T_j, \frac{\partial}{\partial y} T_y \approx T_i,$$

где T_j , T_i - средние значения водопроницаемости в направлениях x и y между узлами j и $j+1$, i и $i+1$ расчетной сетки.

Имеется несколько способов осреднения водопроницаемости: способ гармоник, арифметический и геометрический. В модели использован способ гармоник, в

соответствии с которым осреднённая водопроводимость в направлении x , между узлами j и $j+1$, определяется выражением:

$$T_j = \frac{2T_{i,j}T_{i,j+1}}{T_{i,j} + T_{i,j+1}}$$

В направлении y осреднённая водопроводимость записывается аналогично с соответствующими индексами. Тогда конечно-разностная форма вторых производных в уравнении будет выглядеть:

в направлении x :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{T_j(H_{i,j+1} - H_{i,j}) - T_{j-1}(H_{i,j} - H_{i,j-1})}{\Delta^2}, \quad (4.2.2)$$

в направлении y :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{T_j(H_{i,j+1} - H_{i,j}) - T_{j-1}(H_{i,j} - H_{i,j-1})}{\Delta^2}, \quad (4.2.3)$$

Подставляя полученные выражения в исходное уравнение, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{T_j(H_{i,j+1} - H_{i,j}) - T_{j-1}(H_{i,j} - H_{i,j-1})}{\Delta^2} + \frac{T_i(H_{i+1,j} - H_{i,j}) - T_{i-1}(H_{i,j} - H_{i-1,j})}{\Delta^2} \\ & = -\omega_{i,j} \quad (4.2.4) \end{aligned}$$

Полученное выражение представляет собой уравнение баланса для расчетного блока i,j , в котором левая часть описывает сумму поступающих расходов (Q), а правая - приращение расхода:

$$Q_{j+1,j} + Q_{j-1,j} + Q_{i+1,i} + Q_{i-1,i} = -\omega_{i,j}$$

В соответствии с гидрогеологической схематизацией, источниками и стоками для модели служат площадное питание, поверхностные водотоки, гидравлически связанные с подземными водами, и водозаборы, представленные в форме внутренних и внешних граничных условий. Численные значения задаваемых граничных условий могут как зависеть от напора в данном блоке (участки рек), так и полностью не зависеть от напора в расчетном блоке (площадное питание и водозаборные скважины). Расход, поступающий в водоносный пласт от внешних источников-стоков, в общем виде можно представить выражением:

$$W_{i,j,n} = P_{i,j,n}H_{i,j} + q_{i,j,n}, \quad (4.2.5)$$

где $W_{i,j,n}$ - расход от n -го внешнего источника в ячейку i,j а $P_{i,j,n}$ и $q_{i,j,n}$ - константы.

Учтем все составляющие расхода, которые задаются в модели для блока (i,j) . Обозначим площадное питание как $n=1$, участки рек, гидравлически связанных с подземными водами $n=2$ и водоотбор $n=3$.

Площадное питание ($n=1$) оценивается как независимое от напора в ячейке. В этом случае $P_{i,j,1}=0$, а $q_{i,j,1}$ есть величина постоянного питания, поступающего в блок (i,j) .

$$W_{i,j,1} = q_{i,j,1}, \quad (4.2.6)$$

Второй источник ($n=2$) оценивается таким образом, чтобы взаимосвязь между речным потоком и водоносным пластом можно было бы представить как простую проводимость. Тогда величина просачивания пропорциональна разнице напоров между уровнем в реке и напором в ячейке i,j , следовательно:

$$W_{i,j,2} = Tr_{i,j,2}(Hr_{i,j} - H_{i,j}), \quad (4.2.7)$$

где $Hr_{i,j}$ - напор в реке и $Tr_{i,j,2}$ - проводимость, от которой зависит поток из реки в ячейку i,j и определяется как произведение вертикального коэффициента фильтрации пород, слагающих русло реки и площади ложа реки в пределах ячейки, поделенное на мощность подрусловых отложений. Уравнение (4.2.7) можно переписать в виде:

$$W_{i,j,2} = -Tr_{i,j,2}H_{i,j} + Tr_{i,j,2}Hr_{i,j}, \quad (4.2.8)$$

Сравнение уравнений (4.2.5) и (4.2.8) показывает, что отрицательная проводимость $Tr_{i,j,2}$ соответствует $P_{i,j,2}$ а $Tr_{i,j,2}Hr_{i,j}$ отвечает $q_{i,j,2}$.

Для третьего источника задается только величина водоотбора и уравнение запишется аналогично первому источнику:

$$W_{i,j,3} = q_{i,j,3},$$

В общем случае, если существуют N внешних источников или нагрузок, которые воздействуют на отдельно взятую ячейку, то общий поток выражается:

$$\omega_{i,j} = \sum_{n=1}^N W_{i,j,n} = \sum_{n=1}^N P_{i,j,n} H_{i,j} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,n},$$

Тогда общий внешний поток для ячейки i,j :

$$\omega_{i,j} = q_{i,j,1} - Tr_{i,j,2} + Tr_{i,j,2}Hr_{i,j} + q_{i,j,3}, \quad (4.2.9)$$

С учетом потоков от внешних источников конечно-разностное уравнение (4.2.4) примет следующий вид:

$$\frac{T_j(H_{i,j+1} - H_{i,j}) - T_{j-1}(H_{i,j} - H_{i,j-1})}{\Delta^2} + \frac{T_i(H_{i+1,j} - H_{i,j}) - T_{i-1}(H_{i,j} - H_{i-1,j})}{\Delta^2} = (q_{i,j,1} - Tr_{i,j,2} + Tr_{i,j,2}Hr_{i,j} + q_{i,j,3}) \quad (4.2.10)$$

После преобразования уравнения (4.2.10) и добавления индекса итерации получим общий вид конечно-разностного уравнения для решения:

$$T_j H_{i,j+1}^k + T_{j-1} H_{i,j-1}^k + T_j H_{i+1,j}^k + T_{i-1} H_{i-1,j}^k - H_{i,j}^k (T_j + T_{j-1} + T_i + T_{i-1}) = -\Delta^2 (q_{i,j,1} - Tr_{i,j,2} H_{i,j}^{k-1} + Tr_{i,j,2} Hr_{i,j} + q_{i,j,3})$$

где

T - соответствующие осредненные водопродимости ($\text{м}^2/\text{сут}$);

H^k - напор на k -ой итерации (м);

H^{k-1} - напор на предыдущей итерации $k-1$ (м);

Δ^2 - площадь блока (м);

$q_{i,j,1}$ -- величина питания для блока i,j ($\text{м}^3/\text{сут}$), равная произведению интенсивности питания ($\text{м}/\text{сут}$) на площадь блока;

$Tr_{i,j,2}$ - дополнительная проводимость подрусловых отложений участка реки в пределах блока i,j ($\text{м}^2/\text{сут}$), равная произведению проводимости, задаваемой для участка русла реки длиной 1 м, на длину участка реки в блоке;

$Hr_{i,j}$ - отметка уровня на участке реки в пределах блока i,j (м);

$q_{i,j,3}$ - величина водоотбора скважинами ($\text{м}^3/\text{сут}$) для блока i,j .

Составив такое уравнение для каждого блока, получаем систему линейных конечно-разностных уравнений, которая решается методом сопряженных градиентов.

Метод сопряженных градиентов (МСГ) используется для решения системы линейных алгебраических уравнений вида $Ax=b$ с положительно определенной матрицей A [49, 91]. Это - прямой и итерационный метод одновременно, удобен для выполнения балансовых расчётов тем, что при любом начальном приближении он сходится за конечное число итераций. При использовании МСГ решение x^* находится в виде линейной комбинации A - ортогональных (т.е. ортогональных

относительно скалярного произведения $(x, y) = x^T Ay$ векторов s_1, s_2, \dots, s_n , определяемых процессом A - ортогонализации невязок r_0, r_1, \dots, r_{n-1} последовательных приближений x_0, x_1, \dots, x_{n-1} . Расчетные формулы МСГ задаются следующими рекуррентными соотношениями: если x_0 - начальное приближение, то

$$\begin{aligned} r_0 &= b - Ax_0, & s_1 &= r_0, \\ x_i &= x_{i-1} + \alpha_i s_i, & \alpha_i &= (s_i, r_{i-1}) / (s_i, As_i), \\ r_i &= r_{i-1} - \alpha_i As_i, & s_{i+1} &= r_i - \beta_i s_i, \\ \beta_i &= (r_i, -As_i) / (s_i, As_i). \end{aligned}$$

Процесс заканчивается при некотором $k \leq m$, где m - порядок системы, для которого $r_k = 0$; при этом $x_k = x^*$. МСГ решает задачу минимизации функционала $\varphi(x) = (Ax, x) - 2(b, x)$, эквивалентную исходной. Значения x_i , МСГ совпадают с получаемыми в итерационном процессе $x_{i-1} = x_0, x_{i+1} = x_i + a_i(Ax_i - b) + \beta_i(x_i - x_{i-1})$ при $I > 0$, где a_i и β_i , всякий раз определяются из условия минимума величины $\varphi(x_{i+1})$.

Такой способ получения x , более трудоемок, но существенно более устойчив к вычислительной погрешности. При реализации МСГ решение требует 6 - 10 итераций.

Представление о теоретических основах организации вычислительного процесса необходимо для уверенного управления численной моделью на всех этапах её создания от начальной подготовки исходных данных до задания параметров прогнозных задач при планировании численных экспериментов.

4.3. Методика морфоструктурно-гидродинамического анализа

Методика морфоструктурно-гидродинамического анализа, разработанная доцентом ТПИ А.А. Лукиным (Лукин, 1987), предназначена и использована нами для выявления и картографирования базисных поверхностей, которые выступают уровнями дренирования подземных вод на разных глубинах подземного стока.

При разработке и опробовании данного метода анализа гидрогеологических условий установлена причинно-следственная связь между уровнями подземных вод и базисными поверхностями речных долин различных порядков. При этом наблюдается очевидная закономерность, согласно которой базисные поверхности долин более высоких порядков маркируют более глубокие уровни дренирования

подземных вод. В техническом плане базисные поверхности предложено изображать в виде карт изобазит уровней подземных вод. Они представляют собой линии равных гипсометрических отметок, полученных по точкам пересечения отметок рельефа с тальвегами постоянных поверхностных водотоков.

Методика морфоструктурно-гидродинамического анализа оказывается наиболее эффективной для исследования гидрогеологических условий при остром дефиците информации о глубинах залегания подземных вод на слабоизученных территориях. В этом случае исходной информацией для картографирования элементов подземного стока служат крупномасштабные топографические карты, содержащие информацию об абсолютных отметках рельефа и конфигурации речной сети. Разработаны строгие правила построения карт изобазит, которые предполагают определённую последовательность действий, в которой главным этапом является построение карты речных долин и их классификация по Хортону. Согласно этому подходу, первый порядок речных долин не имеет притоков, а все последующие порядки образуют при слиянии русла одноименных порядков (слияние долин первого порядка образует речную долину второго порядка и т.д.). Карты речных долин различных порядков используются для построения изобазит, которые объединяют одинаковые абсолютные отметки уреза воды речных долин соответствующего порядка (и более высокого). В такой последовательности выполняются подготовительные работы для морфоструктурно-гидродинамического анализа с использованием традиционной обработки топографических карт на бумажных носителях.

В современных условиях описанная технология может быть выполнена с использованием доступных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и обработки с использованием средств вычислительной техники. Для этой цели нами использована ЦМР SRTM 30 и обработка в среде программного комплекса ArcGIS.

Стандартная технология использования модуля Hydrology из группы Spatial Analyst Tools панели инструментов Analyst Tools, позволяет решить поставленную задачу в среде программного комплекса ArcGis.

Выполненную ранее работу по восстановлению речной сети для Томской области предлагается повторить на основе исправленной ЦМР SRTM30 и оценить принципиальную возможность, трудоёмкость и целесообразность использования более детальной ЦМР SRTM3. При этом следует учитывать ограничение покрытия SRTM3 по 60-ой параллели на севере, из-за которого район с. Александровского и г. Стрежевого оказывается за пределами покрытия более детальной ЦМР.

Последовательность создания речной сети на основе ЦМР в среде ПК ArcGis:

1. Загрузить растр ЦМР или его фрагмент.

2. Удалить из растра ошибочные понижения рельефа:

Analyst Tools > Spatial Analyst > Hydrology > Fill.

3. Построить растр направлений стока:

Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction.

4. Построить растр аккумуляции стока:

Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation.

5. Путём редактирования растра аккумуляции стока выделить ячейки, относящиеся к положению тальвегов отрицательных форм рельефа:

Spatial Analyst > Conditional > Set Null (value<20000 Null=1)

или калькулятор растров из «Алгебры карт».

6. Классифицировать растр речных долин с целью выделения их порядков:

Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream Order.

6. Преобразовать растровое изображение речных долин в формат шейп-файла линий: Analyst Tools > Hydrology > Stream to Feature.

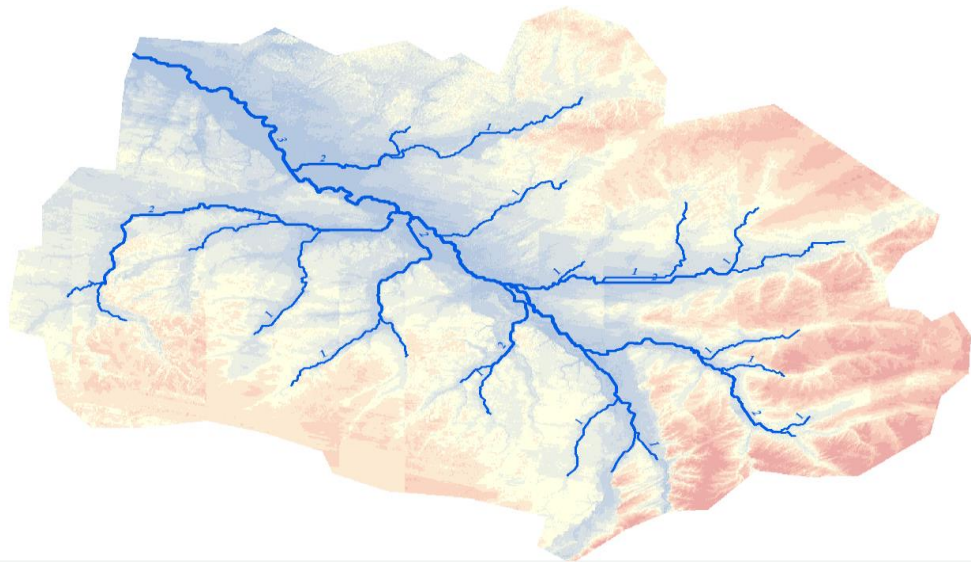


Рисунок – 14 Результат восстановления речной сети (10000 ячеек или 3 порядка)

Вариант восстановления речной сети, показанный на рисунке 14, отражает изменения, вызванные увеличением предельной площади водосборного бассейна на этапе выделения тальвегов речных долин по растру аккумуляции стока. Максимальное количество порядков речных долин сохранилось без изменений (3 порядка), при некотором увеличении длины рек и появлении новых притоков первого порядка (рисунок 15 – 17).

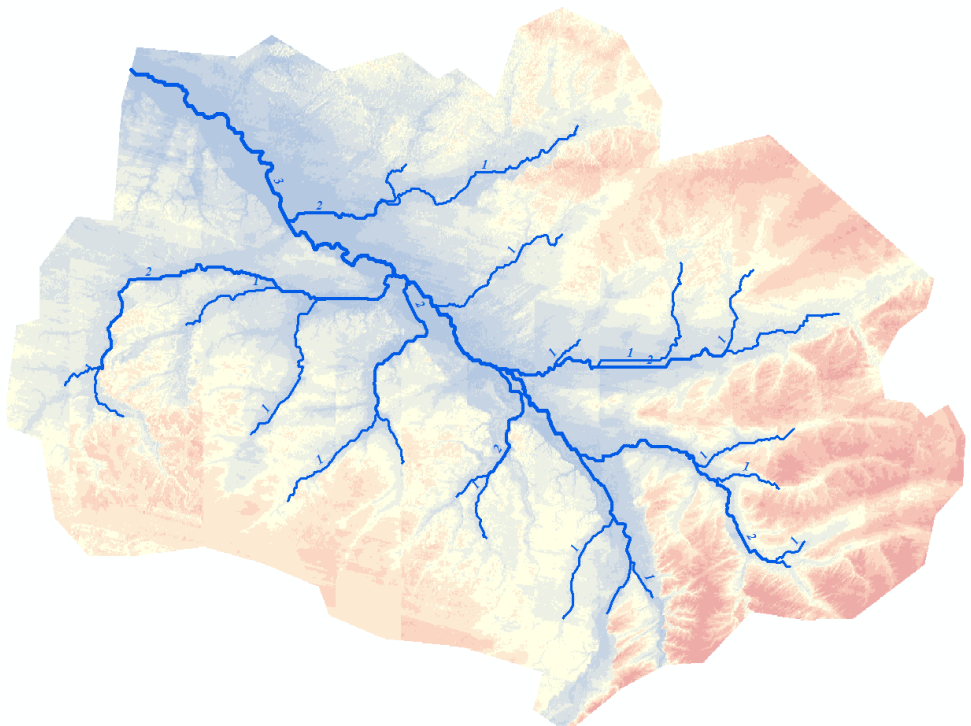


Рисунок – 15 Результат восстановления речной сети (5000 ячеек или 4 порядка)

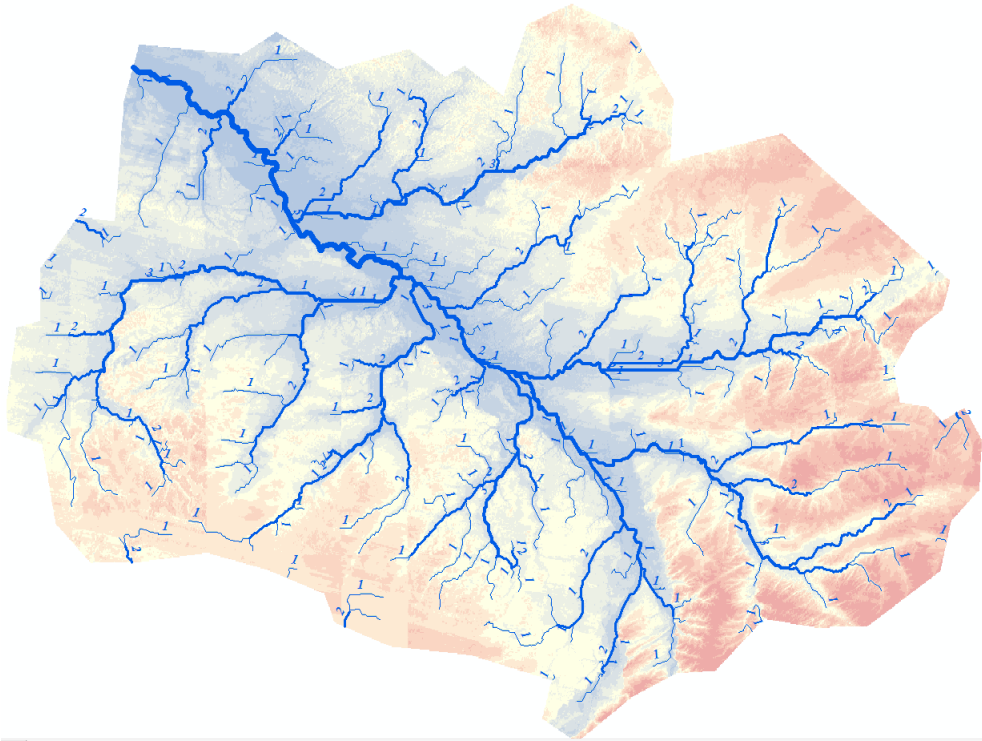


Рисунок – 16 Результат восстановления речной сети (1000 ячеек или 5 порядков)

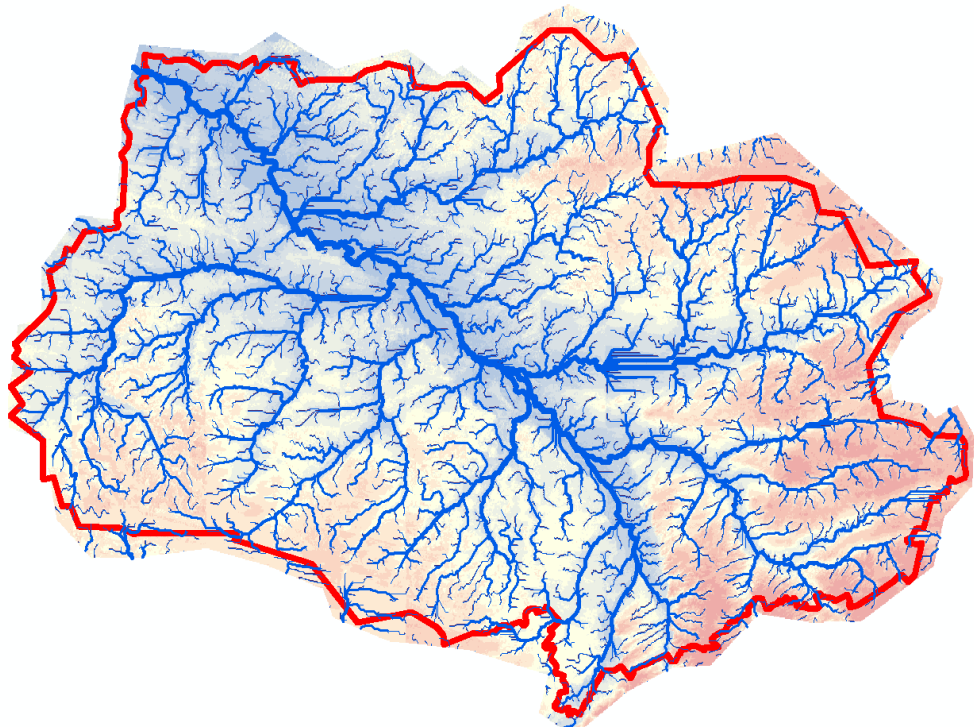


Рисунок – 17 Результат восстановления речной сети (100 ячеек или 6 порядков)

На основе полученной карты речной сети сделаны необходимые преобразования для построения базисных поверхностей с 1-го по 6-ой порядки речных долин. Порядок обработки включает последовательное сохранение участков речных долин в интервале порядков: 1 – 6; 2 – 6; 3 – 6; 4 – 6; 5 – 6; 6 – 6 с

сохранением промежуточных результатов в отдельных шейп-файлах. Их подготовка выполнена путем дробления файла Reki_TO_1_6.shp с использованием выделения объектов в атрибутивной таблице по условию (рисунок 18).

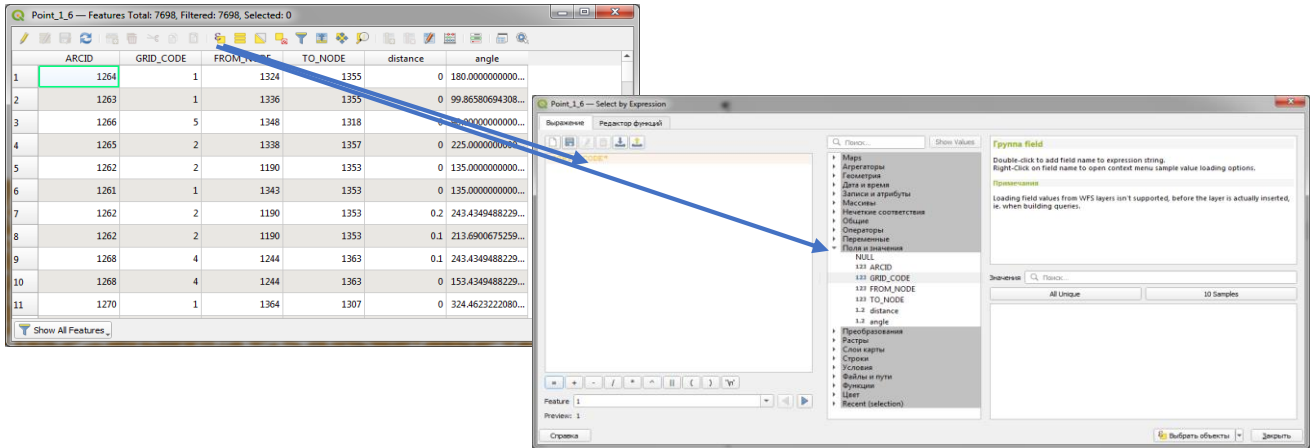


Рисунок – 18 Инструменты выделения объектов в атрибутивной таблице по условию

После выделения участков русла необходимых порядков (например, по условию «GRID_CODE > 3») шейп-файл сохраняется на диске под новым именем с условием сохранения только выделенных объектов. Полученные файлы получают дальнейшую обработку: каждый из них преобразуется в точечные объекты (рисунок 19), затем точечным объектам присваиваются значения абсолютных отметок с использованием плагина (Point Sampling Tool), далее в каждый файл добавляются координаты в десятичных градусах, а после этого в тот же файл координаты картографической проекции Pseudo Mercator.

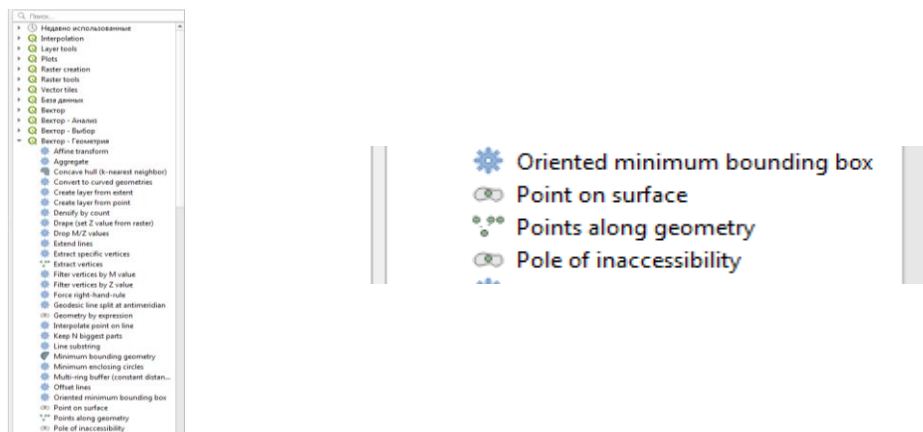
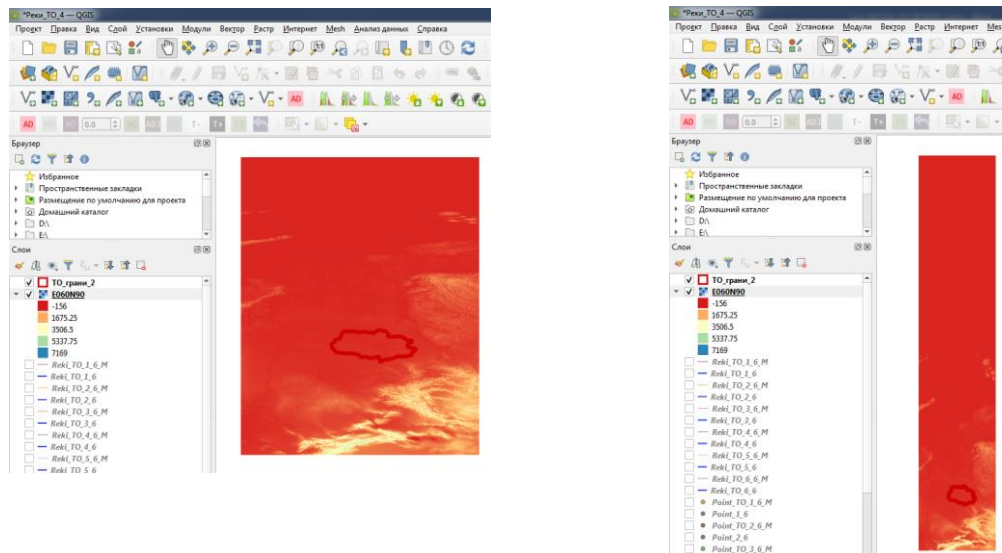


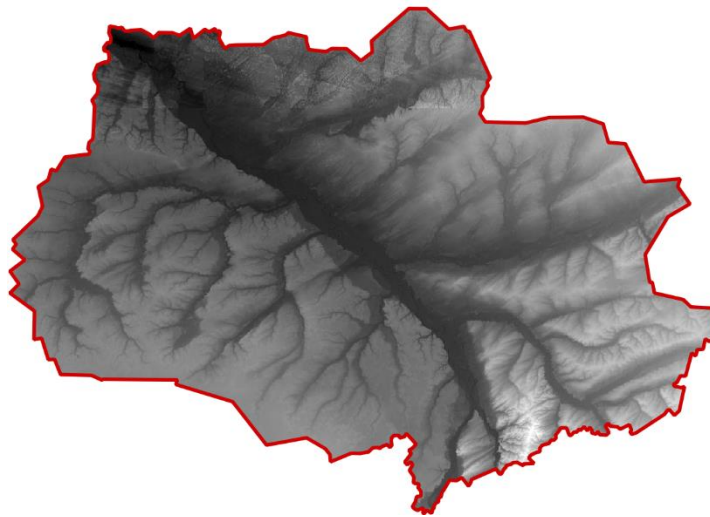
Рисунок – 19 Инструментальная панель ПК QGIS из группы «Вектор-Геометрия»
> Points along geometry

Следующий шаг - обработка цифровой модели рельефа SRTM30 (рисунок 20).



Рисунок– 20 ЦМР SRTM30

Получено представление архива E060N90 ЦМР SRTM30 в картографической проекции Pseudo Mercator (рисунок 21).



Рисунок– 21 Рельеф Томской области в картографической проекции Pseudo Mercator

Получаем архив E060N90, обрезанный по маске границ Томской области в картографической проекции десятичных градусов и сохранённый в файле формата *.tif, представляющий собой рельеф Томской области.

Средствами инструмента Spatial Analyst Tools > Spatial Analyst > Hydrology > Fill выполняется процедура «сглаживания» растра (рисунок 22).

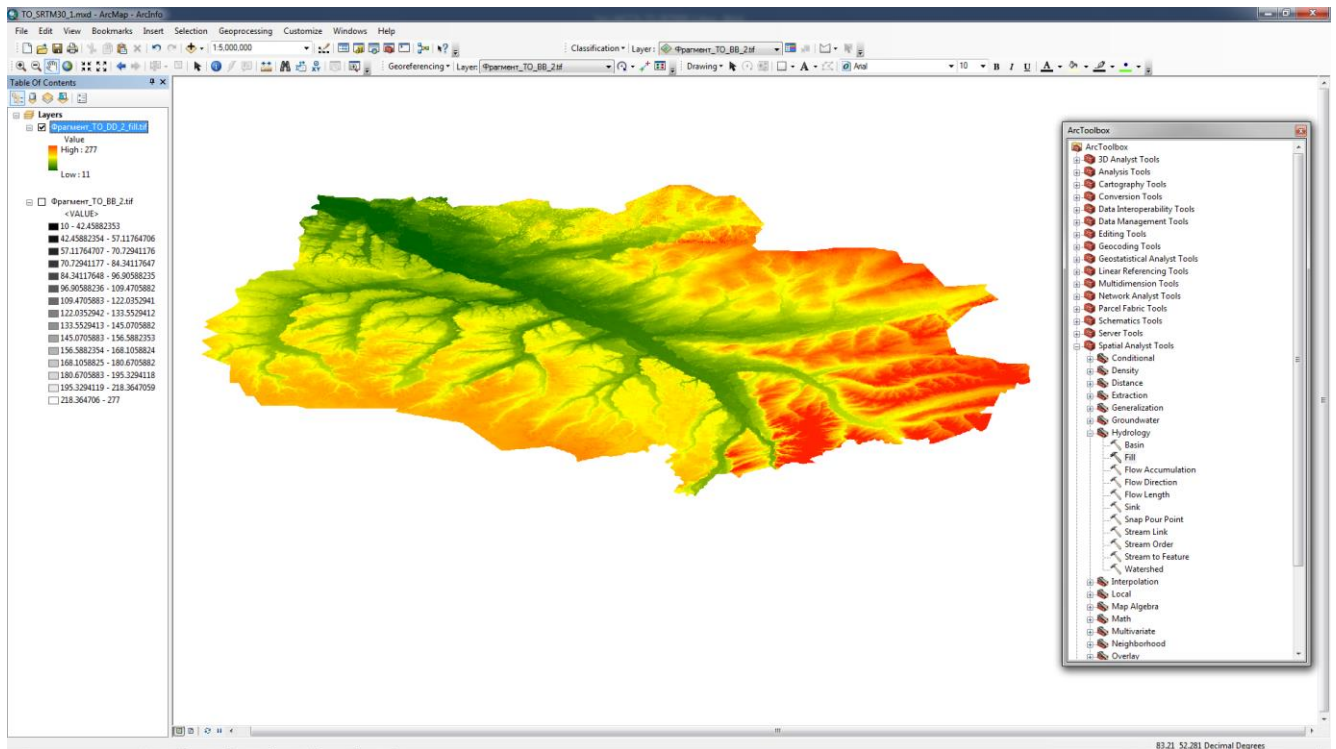


Рисунок – 22 Результат сглаживания рельефа инструментом Spatial Analyst Tools > Spatial Analyst > Hydrology > Fill

Используя инструмент Flow Direction получаем поверхность направлений поверхностного стока (рис 23).

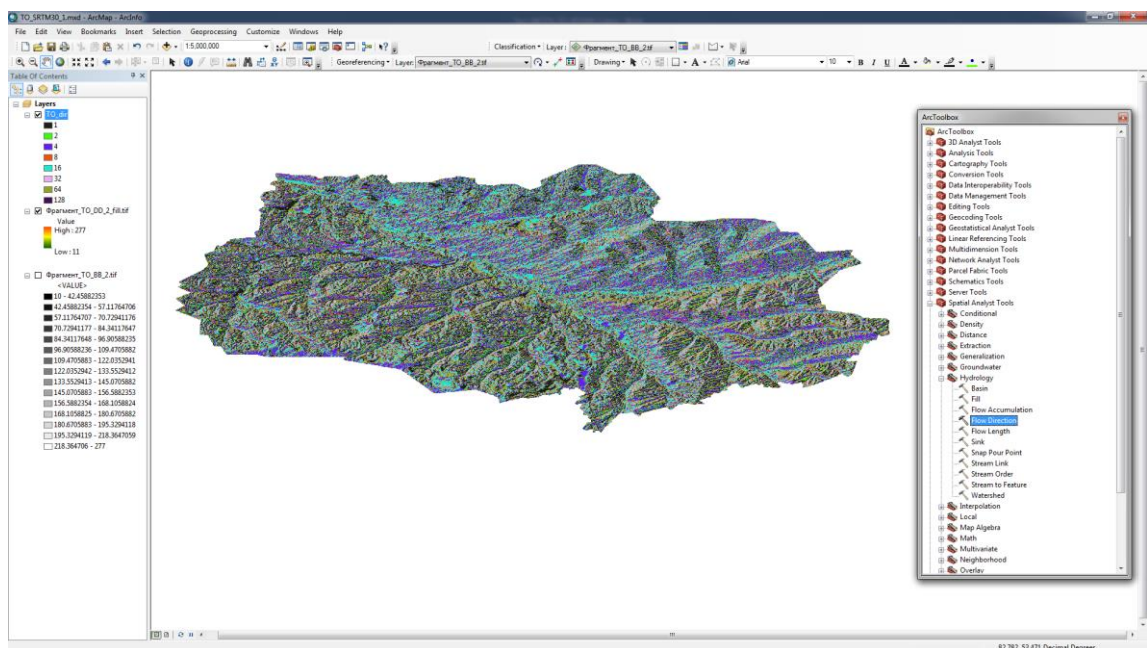


Рисунок – 23 Результат оценки направления поверхностного стока инструментом Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction

И за тем поверхность аккумуляции поверхностного стока (рисунок 24).

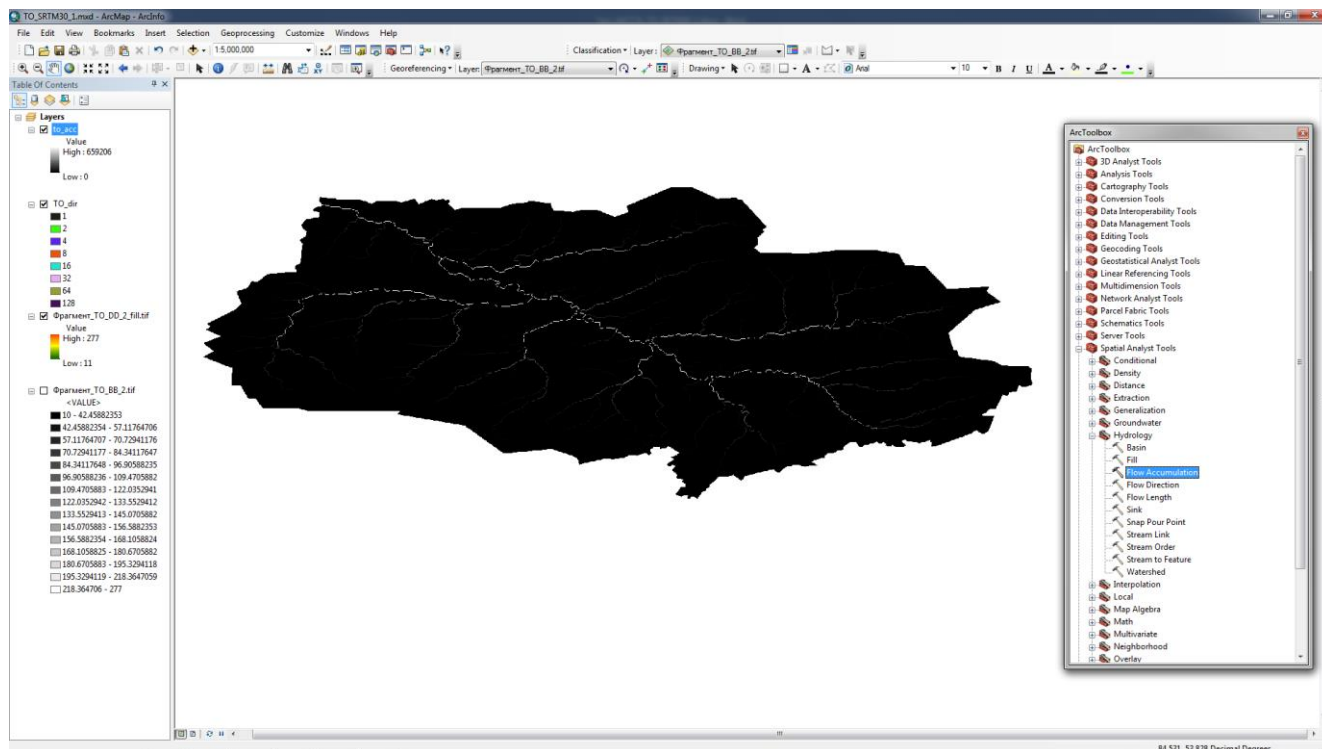


Рисунок – 24 Результат оценки аккумуляции поверхностного стока.

Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation

Инструмент управления значениями раstra Conditional > Set Null избыточное для решения данной задачи количество настраиваемых параметров, затрудняющих его использование без обращения к дополнительным справочным материалам (рисунок 25).

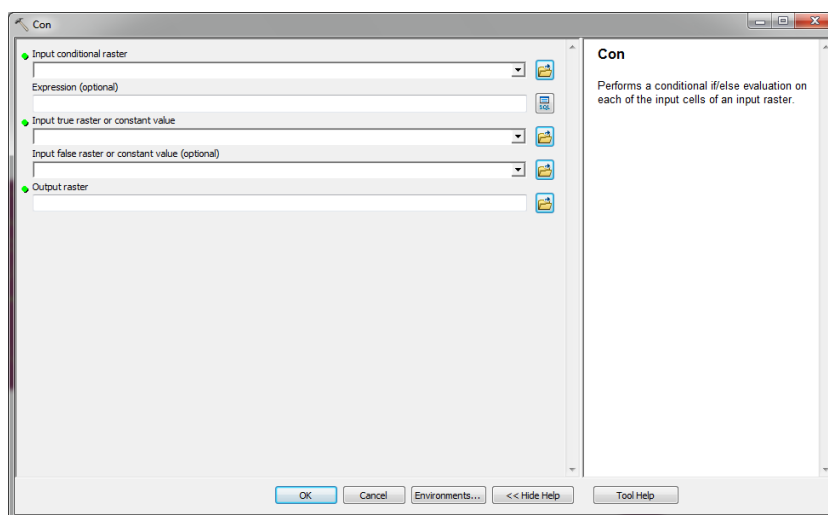


Рисунок – 25 Панель инструмента Spatial Analyst Tools > Conditional > Set Null

Практика показывает, что для этой цели проще использовать калькулятор растров из состава инструментальных средств «Алгебры карт»: Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator (рисунок 26, 27).

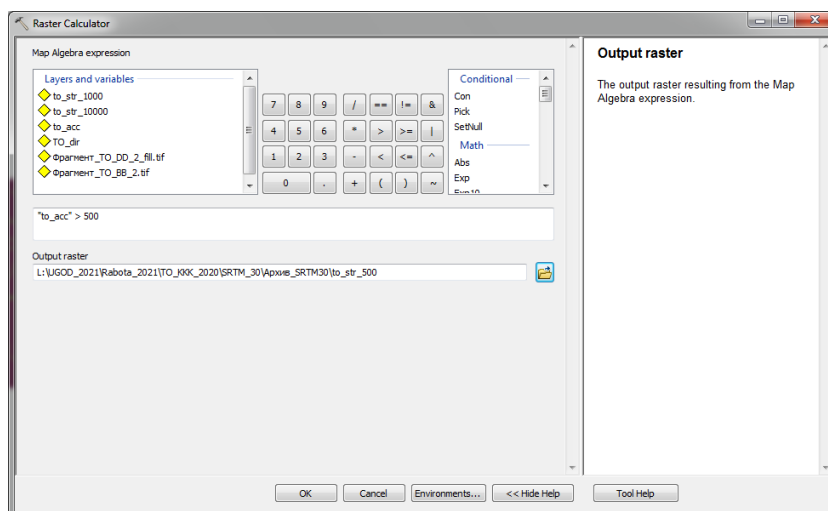
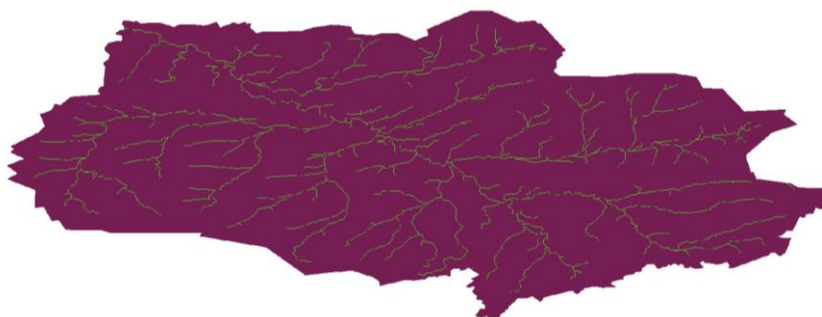


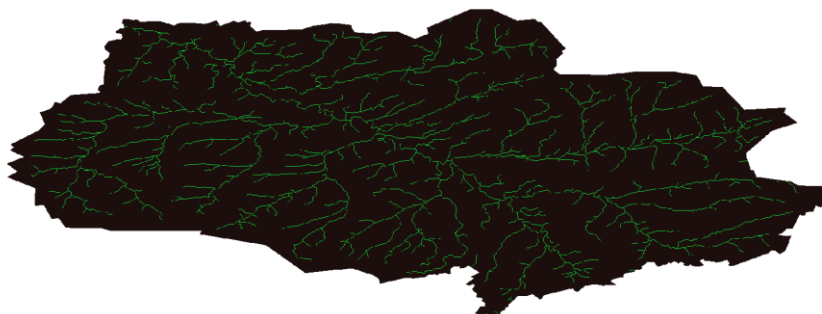
Рисунок – 26 Настройка калькулятора растра на выявление речной сети по массиву ячеек, аккумулирующих стока из более чем 500 ячеек



1



2



3



4



5

Рисунок – 27 Результат использования калькулятора растра для выявления речной сети по массиву ячеек, аккумулирующих стока из более чем 10000 (1), 1000 (2), 500 (3), 250 (4) и 100 ячеек (5)

Средствами инструмента Stream Order выполняется процедура выделения речных долин различного порядка (рисунок 28-30).

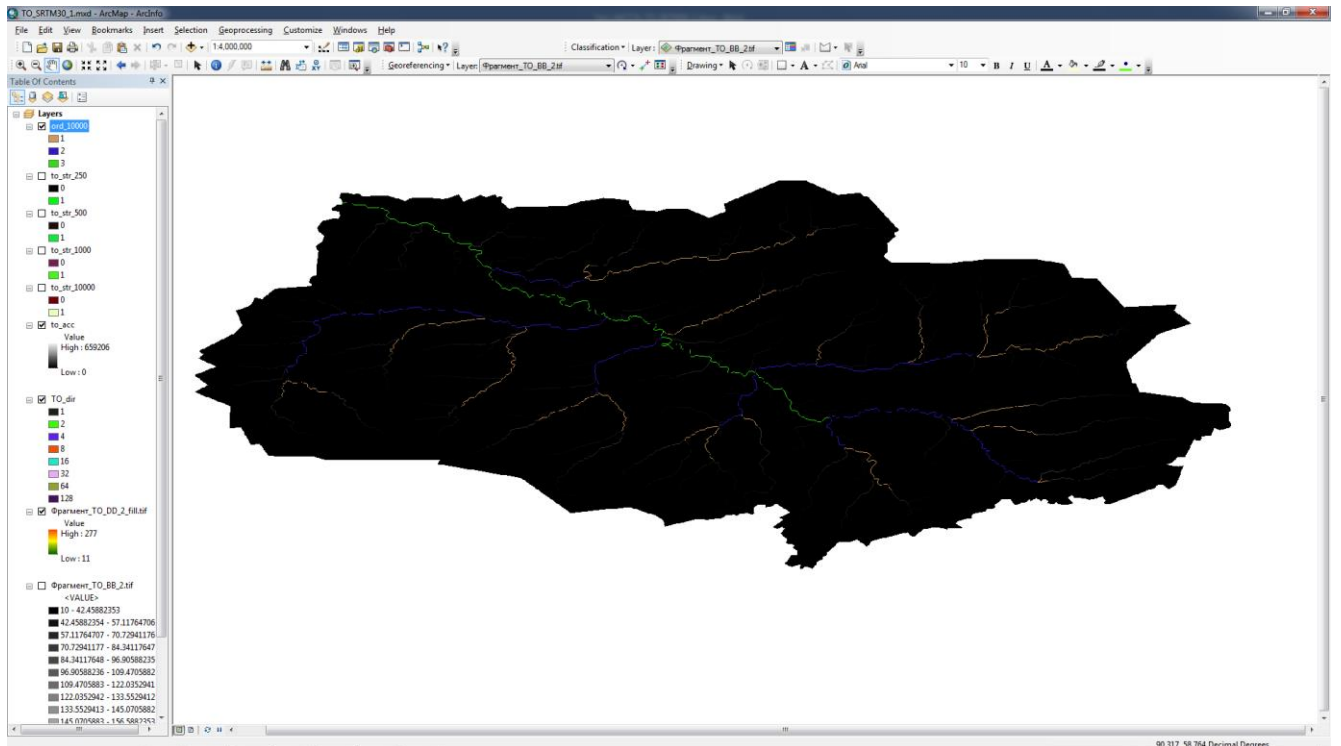


Рисунок – 28 Результат выделения речных долин до 3-го порядка по аккумуляции стока более чем из 10000 ячеек

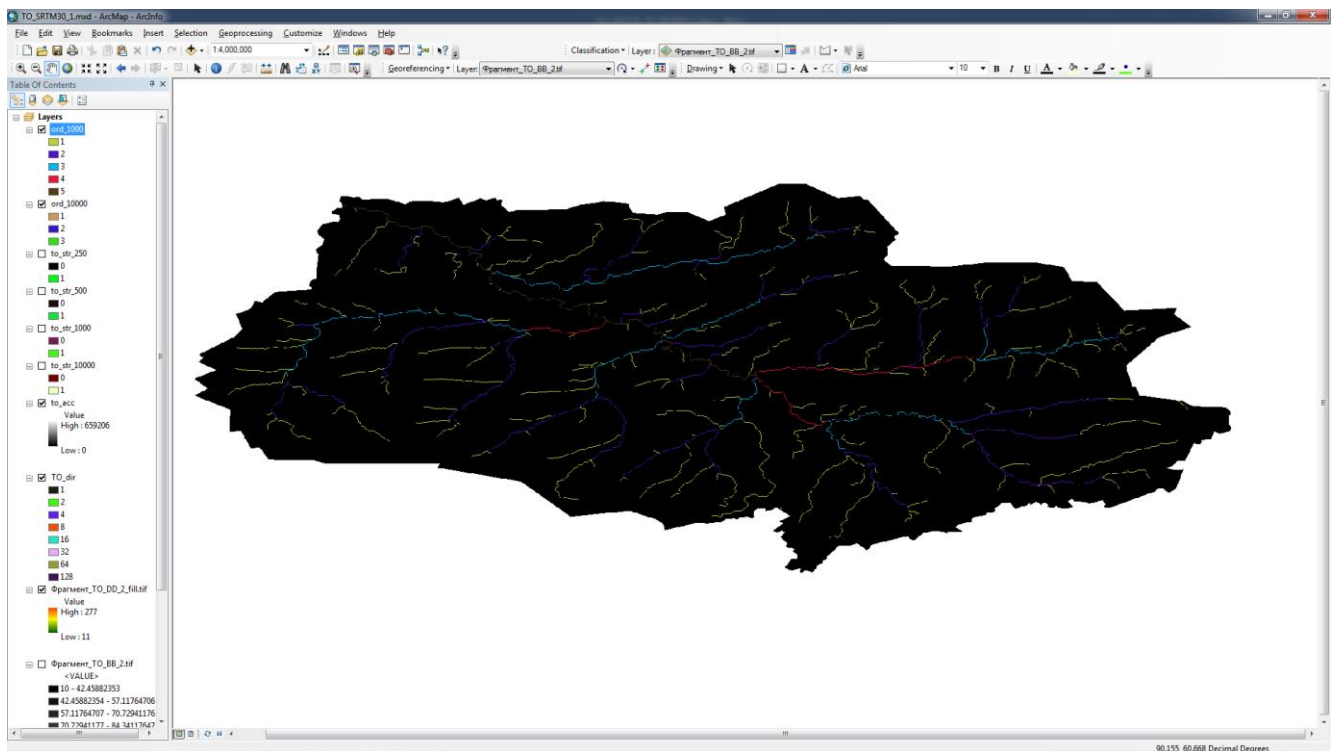


Рисунок – 29 Результат выделения речных долин до 5-го порядка по аккумуляции стока более чем из 1000 ячеек

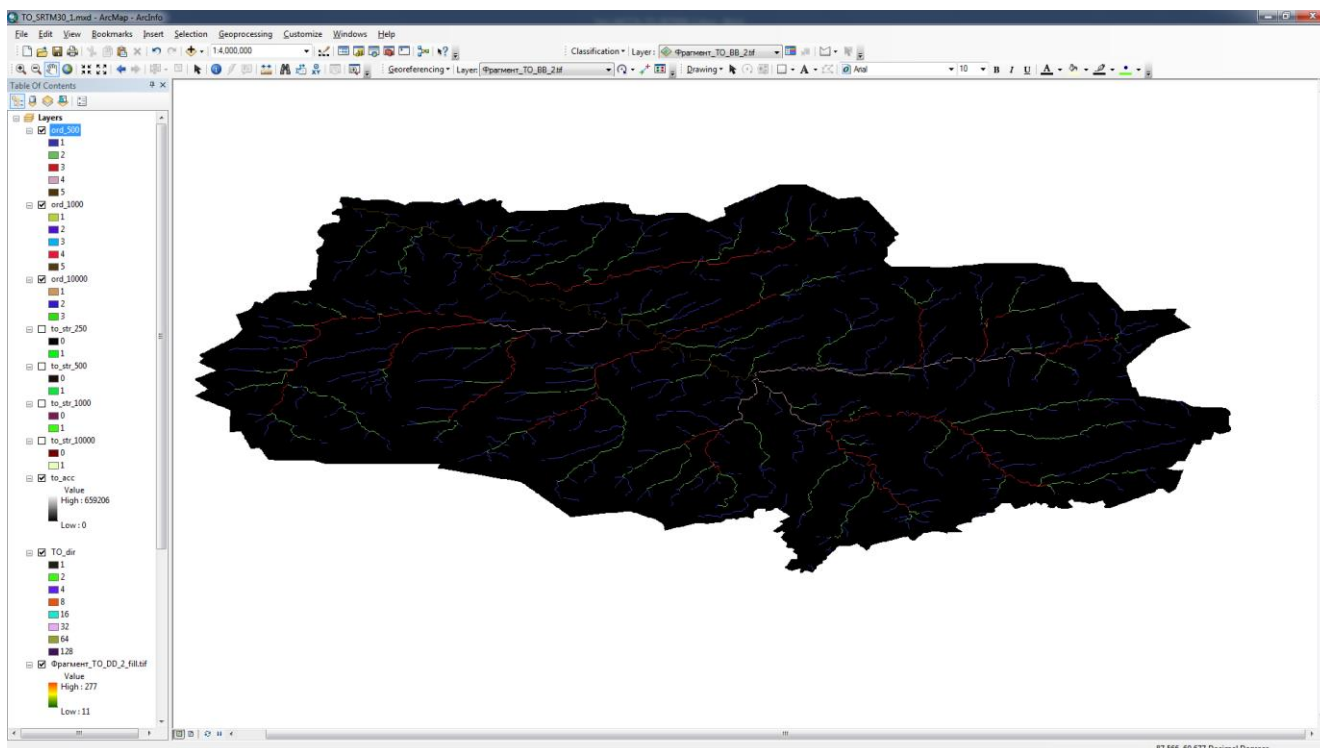


Рисунок – 30 Результат выделения речных долин до 5-го порядка по аккумуляции стока более чем из 500 ячеек.

Накопленный сток из 1000 и 500 ячеек не меняет количества порядков речных долин (5), но увеличивает детальность гидрографической сети (рисунок 31-33).

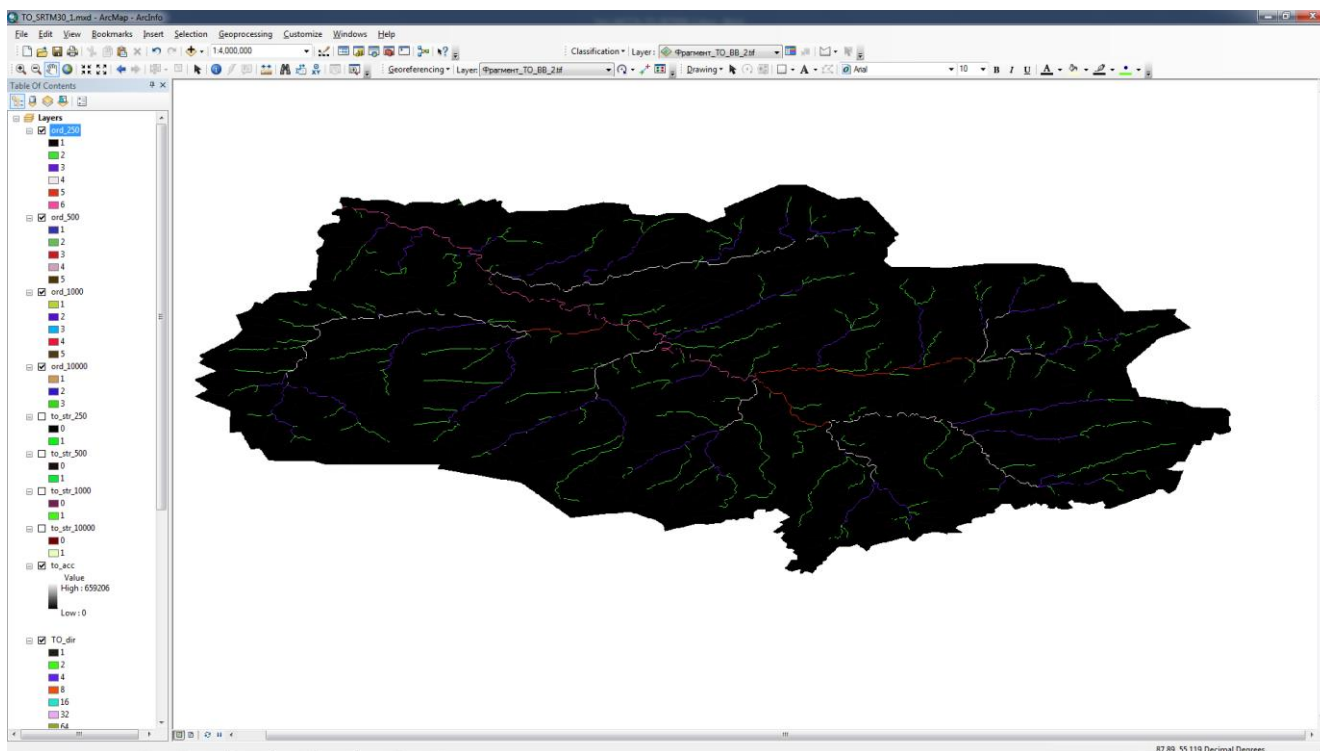


Рисунок – 31 Результат выделения речных долин до 6-го порядка по аккумуляции стока более чем из 250 ячеек

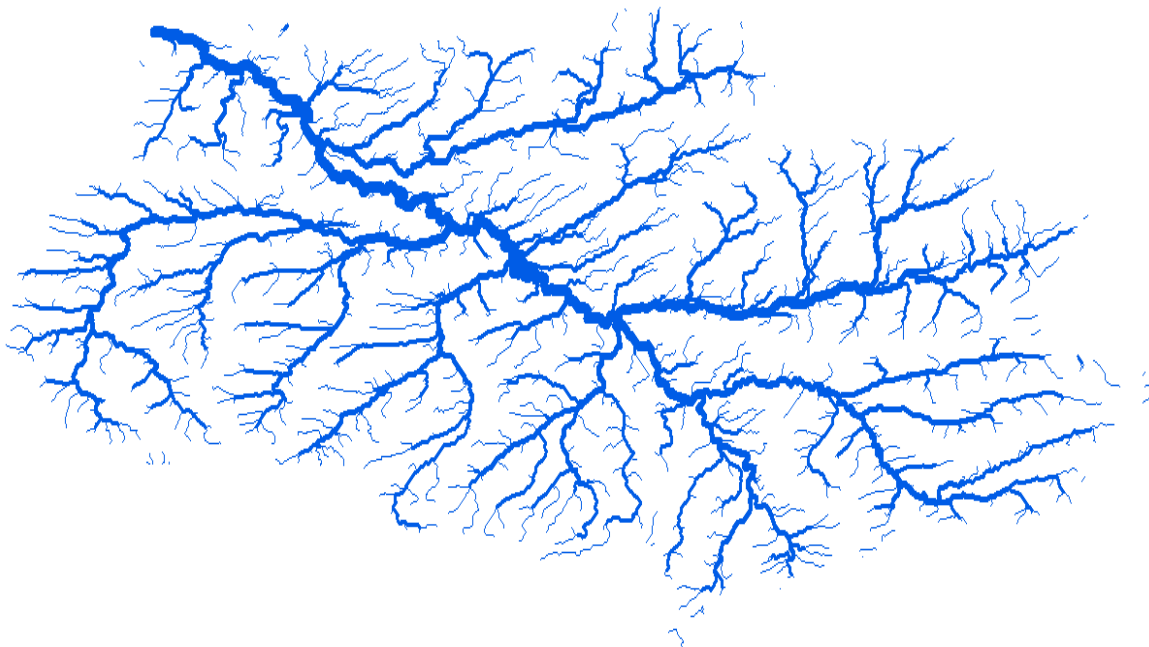


Рисунок – 32 Речная сеть (порядки речных долин с 1-го по 6-ой), восстановленная по аккумуляции стока более чем из 250-ти ячеек на основе ЦМР SRTM30 в картографической проекции десятичных градусов

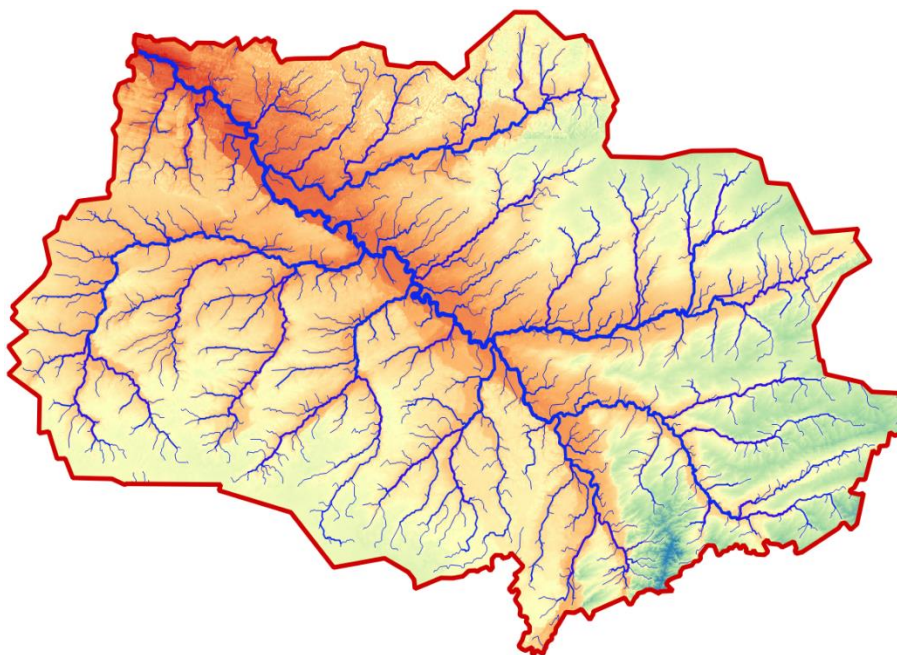


Рисунок – 33 Речная сеть (порядки речных долин с 1-го по 6-ой), восстановленная по аккумуляции стока более чем из 250-ти ячеек на основе ЦМР SRTM30 в границах Томской области (ПК QGIS картографическая проекция Pseudo Mercator)

Следующий шаг - построение базисных поверхностей. В простейшем представлении базисные поверхности строятся по массиву абсолютных отметок тальвегов речных долин различных порядков в интервалах: $1 \div 6$; $2 \div 6$; $3 \div 6$; $4 \div 6$; $5 \div 6$. Ожидается, что одна из этих поверхностей наилучшим образом соответствует уровенной поверхности подземных вод. Соотношение поверхностей разных порядков предположительно даёт представление о пространственном соотношении областей преимущественно нисходящей и восходящей фильтрации (рисунок 34 - 40).

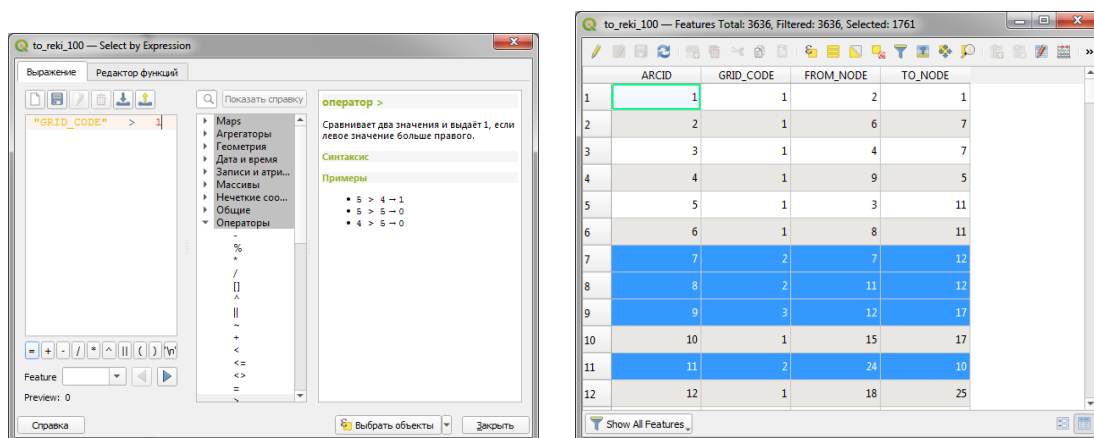


Рисунок – 34 Инструменты выделения объектов по значению поля атрибутивной таблицы (1) и результат фильтрации данных (2)

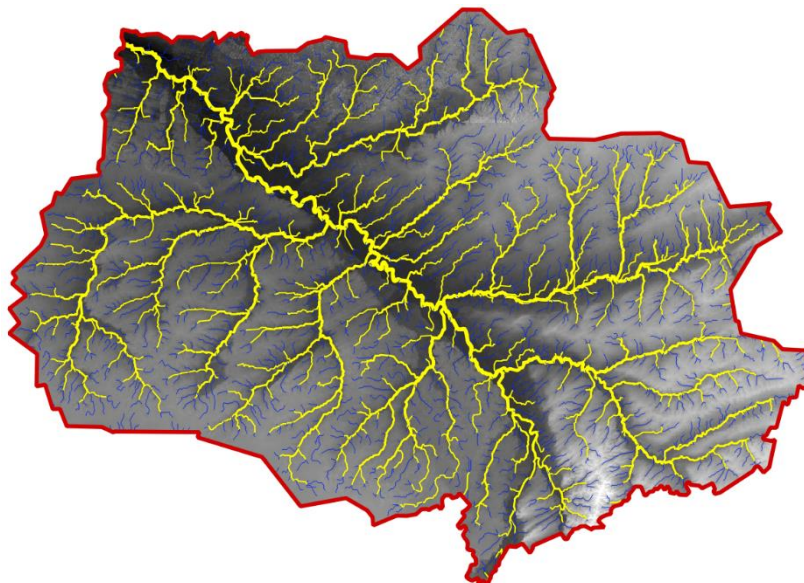


Рисунок – 35 Результат выделения речных долин с 1-го по 6-ой порядок

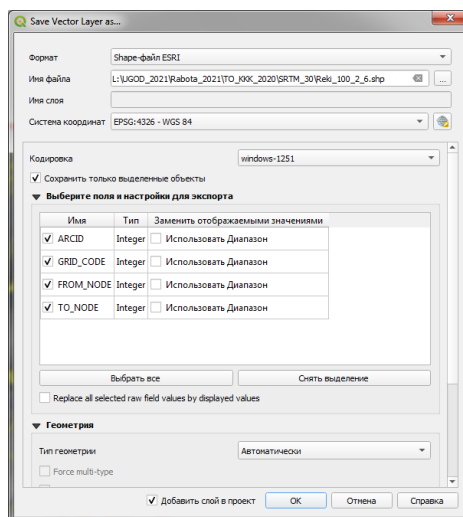


Рисунок – 36 Диалоговое окно сохранения выделенных объектов в отдельном файле

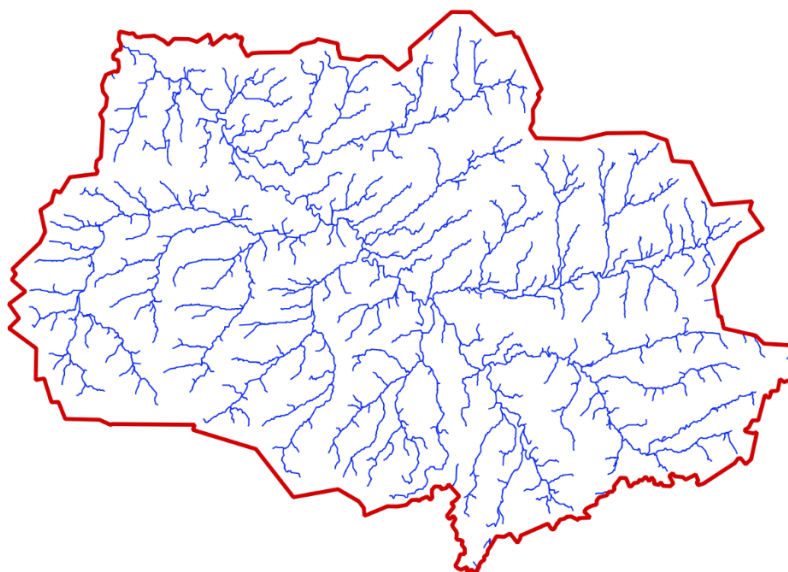


Рисунок – 37 Карта речных долин, имеющих порядок с 2-го до 6-го



Рисунок – 38 Карта речных долин, имеющих порядок с 3-го до 6-го

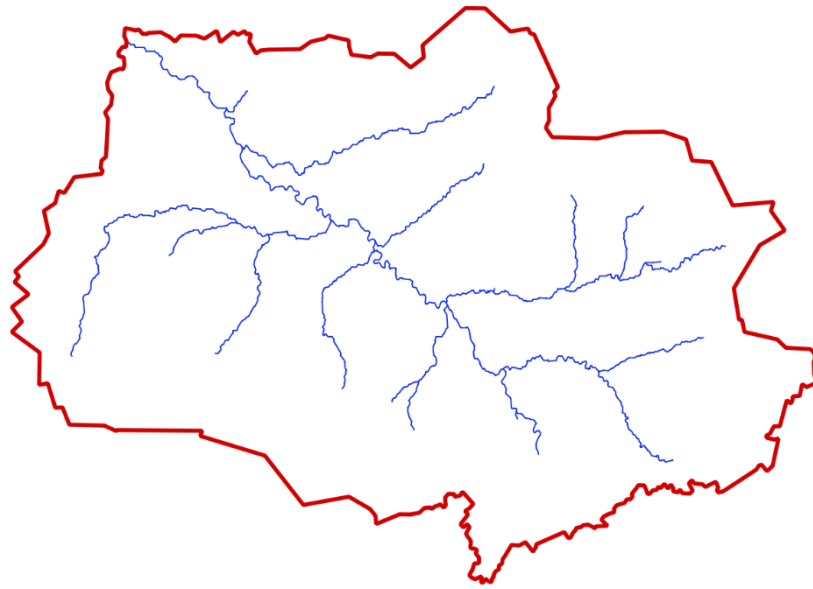


Рисунок – 39 Карта речных долин, имеющих порядок с 4-го до 6-го

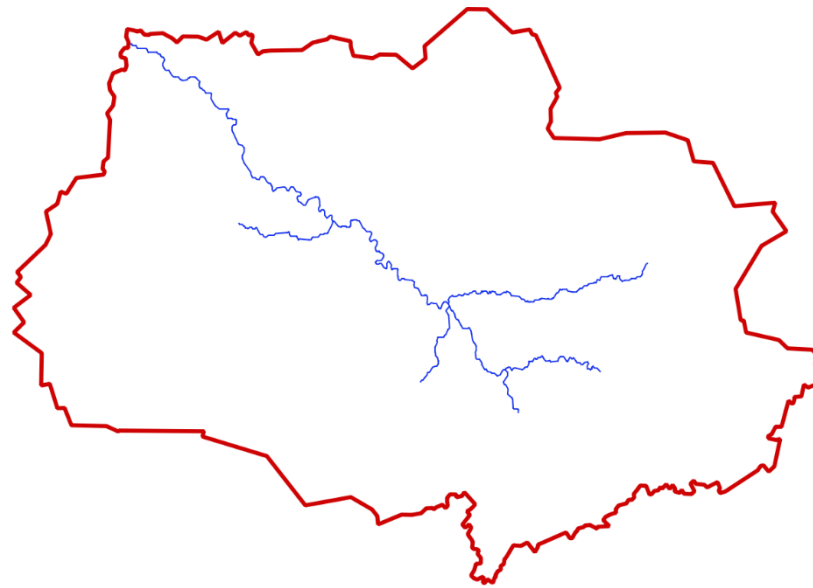


Рисунок – 40 Карта речных долин, имеющих порядок с 5-го до 6-го

Результаты региональных картографических построений, анализа региональных закономерностей изменения показателей химического состава подземных вод; результаты гидродинамического моделирования и морфоструктурно-гидродинамического анализа приведены в главе 5.

5. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

5.1. Региональные гидрогеохимические закономерности

В разделе приводится характеристика основного эксплуатируемого и смежного с ним выше и ниже залегающих горизонтов.

Химический состав и качество подземных вод палеогеновых отложений, определяется особенностями верхней части геологического разреза Западно-Сибирского артезианского бассейна, представляющего собой, в гидродинамическом отношении, единую толщу с горизонтальной ландшафтно-климатической и нормальной глубинной гидрогеохимической зональностями. Формирование состава вод подземных вод палеогеновых отложений происходит в тесном взаимодействии со смежными выше залегающими горизонтами. В условиях преимущественно инфильтрационного питания водоносного комплекса важную роль в формировании геохимического облика подземных вод играют такие факторы как степень увлажнения; дренированность и заболоченность площади области питания; мощность зоны аэрации; литологический состав водовмещающих отложений вышележащих водоносных горизонтов и химический состав к ним приуроченных вод. Помимо этого, имеют место локальные проявления резко отличных по гидрогеохимическому облику воды, характерные по составу и минерализации к водам ниже залегающих водоносных горизонтов, приуроченных, в плане, к зонам разгрузки в долинах крупных рек.

В кровле рассматриваемого водоносного комплекса повсеместное распространение, в пределах исследуемой территории, имеет комплекс неоген-четвертичных отложений. Основное питание неоген-четвертичных отложений осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков на приподнятых участках плоских междуречных пространств и склонах речных долин, а также путем разгрузки напорных вод нижележащих водоносных комплексов.

На территории области значительным распространением пользуются болотные отложения, занимающие более 50 % её площади и перекрывающие неоген-четвертичные осадки, что способствует, при определенных условиях,

формированию особой геохимической обстановки, качественно влияющей на состав подземных вод как вмещающих торфяные отложения водоносные комплексы, так и комплексы, гидрогеодинамически связанные с ними.

Природные особенности территории области способствуют формированию различного химического состава подземных вод неоген-четвертичных отложений лево- и правобережья р. Оби. На правобережье распространены весьма пресные воды с общей минерализацией до 100 – 200 мг/дм³. Лишь в южной части правобережья, а также на площади Обь-Томского междуречья, минерализация их увеличивается до 400 – 500 мг/дм³. Подобное распределение общей минерализации характерно и для вод левобережья р. Оби. Отмечаются участки с повышенной минерализацией вод более 500 мг/дм³ в южной части области, в долинах рек Оби, Васюгана и Чулыма, приуроченные к освоенным в хозяйственном отношении площадям.

По составу воды неоген-четвертичных горизонтов в пределах водоразделов являются типичными гидрокарбонатными кальциевыми, в долинах рек состав их пестрый.

Хлориды присутствуют в водах на всей территории области в небольших концентрациях до 10 мг/дм³. Повышенные содержания их до 300 мг/дм³ и более отмечаются чаще всего на обжитых территориях, обычно в долинах рек. Сульфаты встречаются значительно реже и, в основном, в концентрациях до 10 мг/дм³. На территориях населенных пунктов их содержание в подземных водах достигают иногда 100 мг/дм³ и более за счет дымовых выбросов многочисленных котельных.

В катионном составе вод основным компонентом является кальций, на долю которого приходится 40 – 90 %-экв. Концентрации кальция изменяются от 1,0 до 300 мг/дм³, причем минимальные его значения относятся к центральной части правобережья р. Оби. Натрий в водах присутствуют повсеместно, обычно их содержания не превышают 20 мг/дм³. Доля их в общем составе воды в центральной части правобережья р. Оби весьма значительна, воды по составу здесь натриевые или смешанного состава с преобладанием натрия. В южной части области

содержание натрия часто более 20 мг/дм³, а в некоторых пунктах достигает 100 мг/дм³ и более, что связано с влиянием техногенного фактора.

Воды неоген-четвертичных отложений мягкие и умеренно жесткие, обладают слабокислой и слабо щелочной реакцией. Они содержат большое количество органического растворенного вещества, особенно в центральных и северных районах, где немаловажную роль играют залегающие сверху болотные массивы. Величина перманганатной окисляемости изменяется от 1,0 до 10 мгО₂/дм³, в долинах рек может достигать 15 – 31 мгО₂/дм³, а на заболоченных пространствах междуречий увеличивается до 45 мгО₂/дм³.

Железо, как и органическое вещество, является специфическим компонентом, свойственным всем пресным водам гумидной зоны. Содержание его изменяется в очень широких пределах от 0,05 до 20 мг/дм³. Минимальные концентрации железа в водах южных районов области не превышают 0,2 - 2,0 мг/дм³. Как и железо, широким распространением в водах пользуются марганец.

Для анализа особенностей химического состава подземных вод палеогеновых отложений в границах исследуемой территории нами выделено 9 вариантов сочетания рассматриваемых нами естественных факторов формирования химического, что позволяет выполнить такой анализ более детально (таблица 7).

Наибольшим количеством объектов наблюдения (по скважинам) представлены воды, приуроченные к отложениям континентального генезиса (относительно хорошо проницаемые отложения правобережья р. Оби) в пределах подтаежных ландшафтов, перекрытых отложениями неоген-четвертичного возраста песчаного и супесчаного литологического состава. Выборка составляет 231 объект. Наименьшее значение, 13 объектов, относится к отложениям континентального генезиса, развитых в пределах ландшафтов средней тайги перекрытых отложениями песчаного и супесчаного литологического состава. Среднее значение выборки по выделенным площадям составляет свыше 50.

Факторы формирования химического состава подземных вод палеогеновых отложений

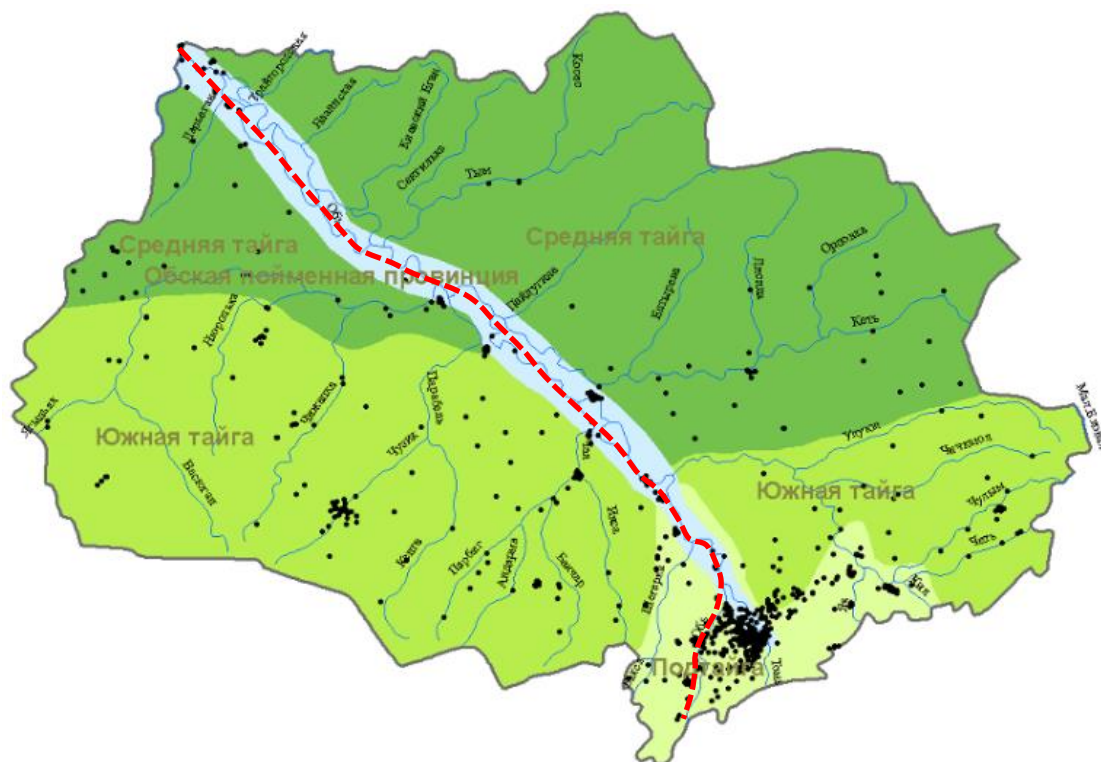
Тип водовмещающих отложений	Ландшафтные условия	Литологическая характеристика перекрывающих отложений	Количество анализов
Отложения прибрежно-морского, московского генезиса (относительно плохо проницаемые)	Ландшафт среднетаежный	Глинистый и суглинистый	42
		Песчаный и супесчаный	25
	Ландшафт южнотаежный	Глинистый и суглинистый	84
		Песчаный и супесчаный	40
Отложения континентального генезиса (относительно хорошо проницаемые)	Ландшафт среднетаежный	Песчаный и супесчаный	13
	Ландшафт южнотаежный	Глинистый и суглинистый	37
		Песчаный и супесчаный	53
	Ландшафт подтаежный	Глинистый и суглинистый	94
		Песчаный и супесчаный	231
Итого:			619

При более детальном рассмотрении особенностей формирования водных ресурсов на исследуемой площади, опираясь на имеющийся фактический материал (включая данные ООО «Томскгеомониторинг»), можно утверждать, что пространственная изменчивость химического состава подземных вод палеогеновых отложений, подчиняется общим природным закономерностям (таблица 8, рисунок 41).

Средние значения компонентов химического состава подземных вод палеогеновых отложений.

Литологический состав водовмещающих пород	Ландшафт	Литологический состав перекрывающих отложений	Ca, мг/дм ³	Na, мг/дм ³	K, мг/дм ³	Mg, мг/дм ³	HCO ₃ , мг/дм ³	Cl, мг/дм ³	SO ₄ , мг/дм ³	M _{общ} , мг/дм ³	pH, ед	Ж _{общ} , мг-экв	Окисляемость O ₂ , мг/дм ³	Fe _{общ} , мг/дм ³
Отложения прибрежно-морского, морского генезиса (относительно плохо проницаемые)	среднетаежный		84,0	33,9	1,9	19,2	426,4	12,5	7,7	585,6	7,4	6,0	11,8	5,1
		Глинистый и суглинистый	90,2	35,8	2,5	21,4	452,2	14,6	8,3	624,9	7,5	6,5	14,5	3,7
		Песчаный и супесчаный	75,8	31,4	1,6	16,0	396,1	9,3	7,2	537,5	7,3	5,4	5,2	6,8
	южнотаежный		90,1	43,7	3,7	25,7	432,3	48,6	8,3	652,3	7,3	6,3	5,1	3,9
		Глинистый и суглинистый	94,7	43,1	4,0	26,5	460,2	40,9	7,8	677,2	7,3	6,4	5,2	4,0
		Песчаный и супесчаный	83,1	42,8	2,7	24,5	379,4	65,1	10,7	608,3	7,2	6,1	4,9	3,8
Среднее значение отложения прибрежно-морского, морского генезиса			90,8	39,4	3,2	23,1	426,7	34,3	7,8	625,4	7,4	6,2	7,2	4,2
Отложения континентального генезиса (относительно хорошо проницаемые)	среднетаежный		27,1	16,8	1,5	13,4	186,6	5,4	2,5	253,3	7,3	2,7	7,5	5,2
		Песчаный и супесчаный	22,6	17,2	1,4	12,5	167,5	5,6	2,5	229,3	7,3	2,5	7,4	4,7
	южнотаежный		67,8	18,3	4,8	15,8	322,0	12,6	9,9	451,2	7,3	4,7	3,9	5,9
		Глинистый и суглинистый	63,2	14,9	9,2	13,2	298,1	6,1	11,5	416,3	7,3	4,4	2,8	5,4
		Песчаный и супесчаный	71,4	20,5	1,5	17,5	339,7	17,4	9,1	477,2	7,3	4,9	4,7	6,3
	подтаежный		73,9	27,0	1,7	17,8	345,7	20,5	10,7	497,4	7,3	5,3	2,7	4,4
		Глинистый и суглинистый	81,3	37,4	2,0	21,4	420,3	14,3	8,7	585,4	7,4	5,8	2,5	3,7
		Песчаный и супесчаный	71,1	20,0	1,6	16,6	316,0	22,6	11,2	459,0	7,2	5,0	2,7	4,7
		Среднее значение по водовмещающим отложениям континентального генезиса			70,9	24,1	2,4	17,3	334,5	18,0	10,5	477,6	7,3	5,0
итог			77,0	29,9	3,0	19,1	363,6	23,8	9,9	526,2	7,3	5,4	4,5	4,6

Отмеченные закономерности более ярко проявляются для вод правобережья р. Обь. Этому способствует литологический состав водовмещающих отложений палеогена и вышележащих четвертичных отложений, представленных слабо проницаемыми отложениями.



----- Предполагаемая граница между водовмещающими отложениями прибрежно-морского, морского генезиса (относительно плохо проницаемые, левобережье р. Обь) и континентального происхождения (относительно хорошо проницаемые, правобережье р. Обь)

Рисунок – 41 Ландшафтные условия Томской области и предполагаемая граница между водовмещающими отложениями различного литологического состава

Тесная гидродинамическая связь отложений палеогенового и четвертичного возраста способствует формированию химического состава подземных вод комплекса в условиях более интенсивного воздействия гидрометеорологических факторов, повышенной дренированности правобережья р. Обь и, как следствие более интенсивного водообмена.

На основе анализа полученных данных (приведенных в таблице 8) установлено, что наиболее минерализованные воды распространены в пределах территории южной тайги, приурочены к относительно плохо проницаемым

отложениям левобережья р. Обь, перекрытых отложениями преимущественно глинистого, суглинистого состава и имеют средние значения около 678 мг/л. Наименьшее значение минерализации, 230 мг/л, получено для северной ландшафтной зоны средней тайги, в условиях относительно хорошо проницаемых отложений правобережья р. Обь, в кровле перекрытых отложениями песчаного и супесчаного состава.

Средние значения минерализации подземных вод левобережья р. Обь (рисунок 42) демонстрируют меньшее влияние гидрометеорологических факторов на химический состав. Здесь лучшая защищенность водоносных горизонтов и меньшая дренированность способствует увеличению времени водообмена и, в следствии этого, росту минерализации. Тем не менее, тенденции, связанные с общими природными закономерностями изменения химического состава подземных вод, сохраняются.

Воды палеогеновых отложений по составу типичные гидрокарбонатные магниево-кальциевые, в основном, умеренно-жесткие и жесткие, с величиной минерализации 300 – 400 мг/дм³ на левобережье р. Оби и юге области и мягкие, с величиной минерализации 100 – 200 мг/дм³ - в центральной части правобережья р. Оби (рисунок 43-45).

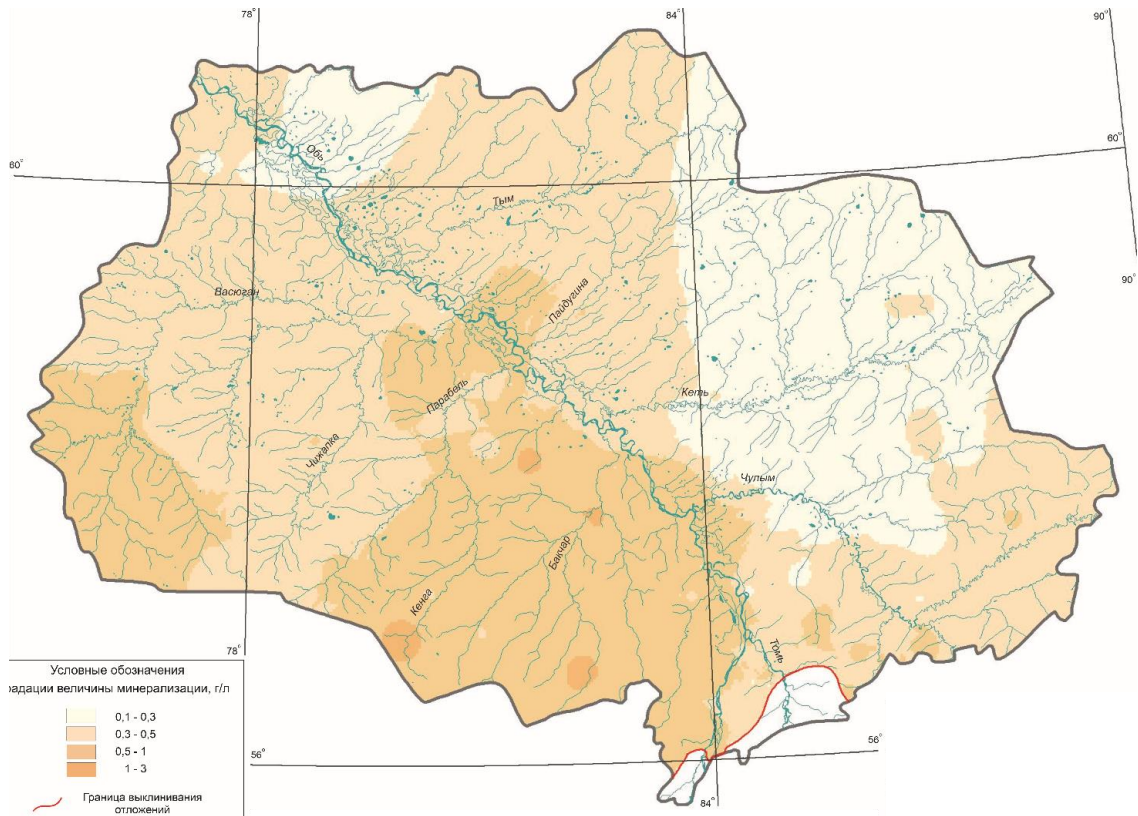


Рисунок – 42 Карта общей минерализации подземных вод палеогеновых отложений

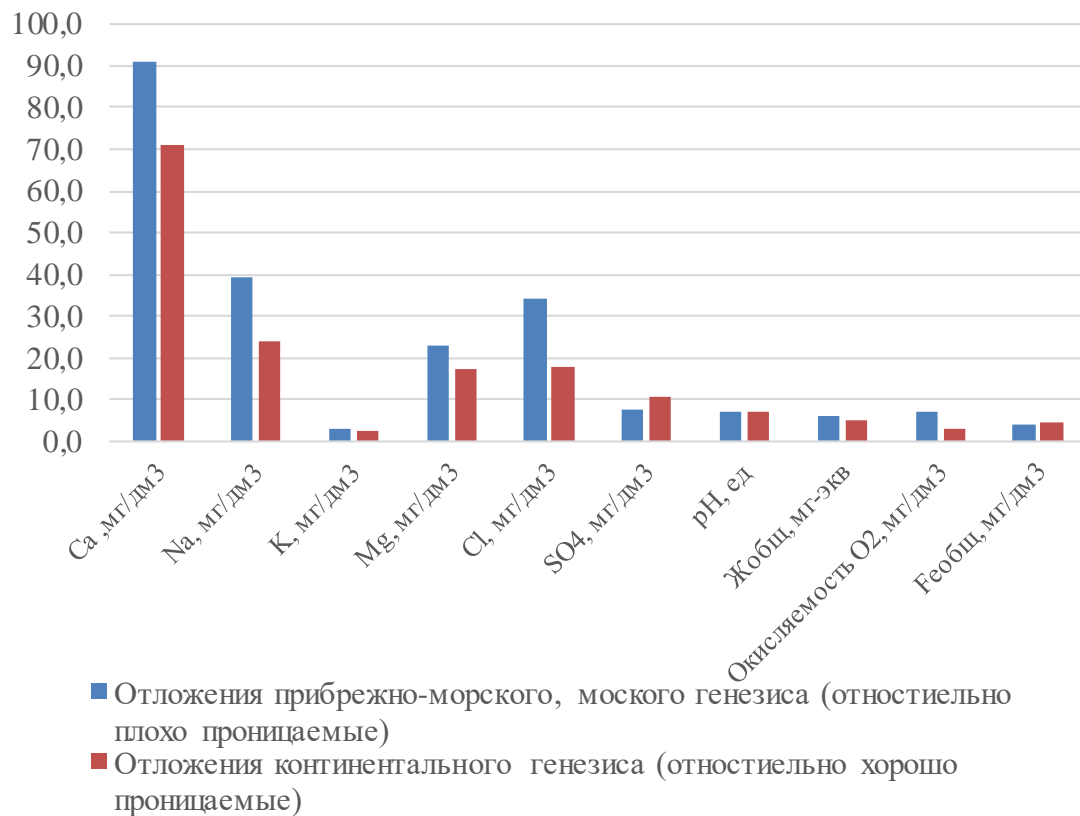


Рисунок – 43 Средние значения химического состава подземных вод палеогеновых отложений в условиях различного литологического состава водовмещающих отложений.

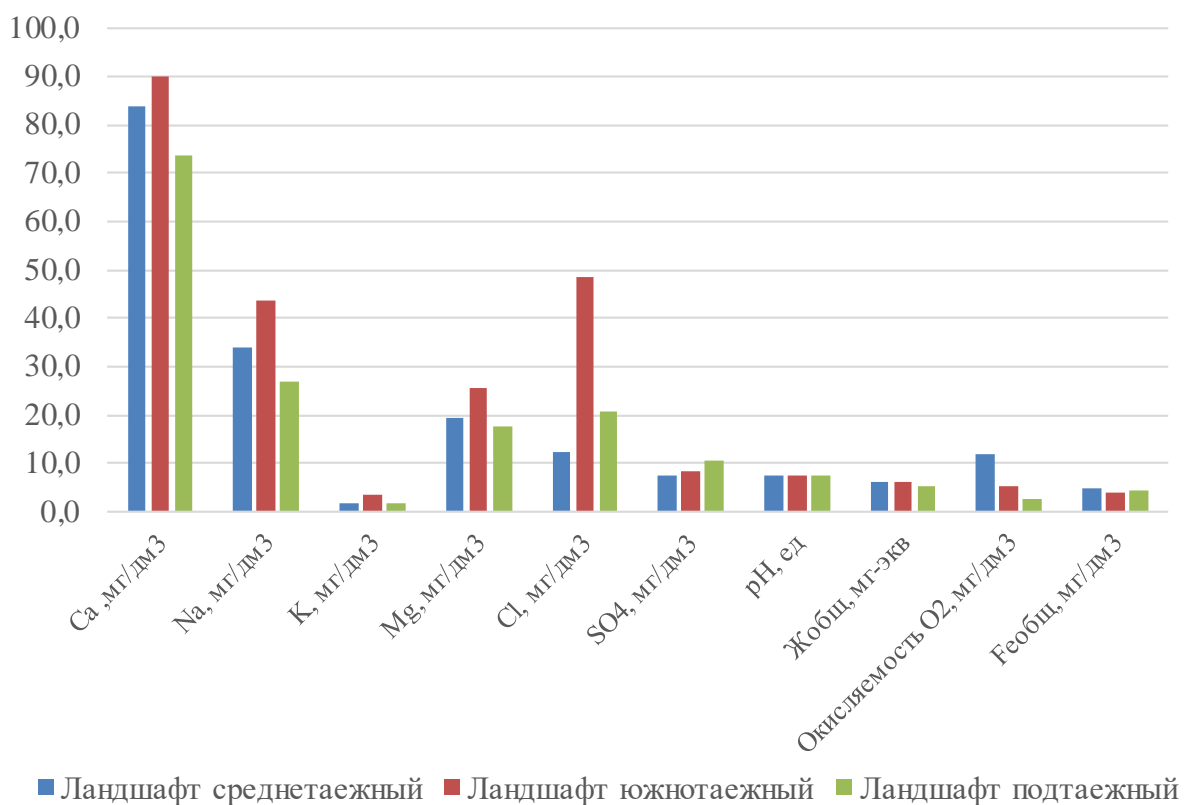


Рисунок – 44 Средние значения химического состава подземных вод палеогеновых отложений в условиях различных ландшафтных условий.

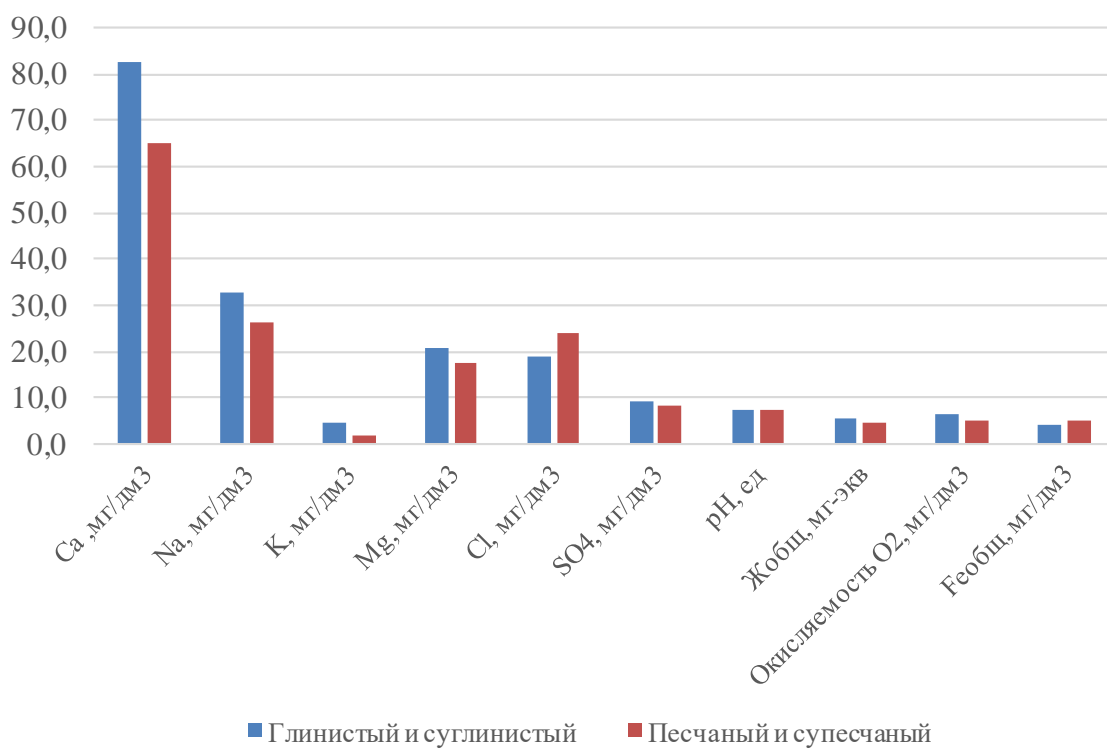


Рисунок – 45 Средние значения химического состава подземных вод палеогеновых отложений в различных условиях литологического состава перекрывающих отложений.

Характерной особенностью является общее увеличение минерализации и жесткости воды с севера на юг. Среда вод нейтральная и слабощелочная. Концентрации хлоридов, в большинстве случаев, занижены и лежат в пределах от 1 – 5 мг/дм³ до 10 – 15 мг/дм³. Содержание сульфатов минимально и часто характеризуется значениями 2 – 6 мг/дм³.

Катионный состав вод палеогеновых отложений характеризуется высокой степенью невыдержанности, сменяемостью по разрезу и площади: на правобережье р. Оби он однородный, на левобережье - более разнообразен. Здесь ведущее место принадлежит катионам кальция, но отмечается увеличение содержания ионов натрия, иногда магния. Так, если в пределах правобережья р. Оби, содержание натрия в водах палеогеновых отложений составляет в среднем 2 – 20 мг/дм³, то на левобережье оно изменяется от 10 до 130 мг/дм³, иногда и более.

Разные условия залегания водоносных отложений палеогена на территории области способствуют формированию различий природного химического состава подземных вод. С продвижением на север происходит погружение отложений, увеличение их мощности, возрастает фациальная изменчивость отложений одного и того же возраста вследствие разных условий осадконакопления. Этим обусловлено то, что в южной части области основной состав вод палеогеновых отложений юрковской свиты является гидрокарбонатным кальциевым с невысокой минерализацией до 300 – 400 мг/л³, а в юго-западной, западной и северной частях области состав вод юрковской и тавдинской свит (аналога юрковской) становится хлоридным натриевым либо гидрокарбонатно-хлоридным кальциево-натриевым с повышенной величиной минерализации до 600 - 700, иногда и более 1000 мг/дм³ (рисунок 46).

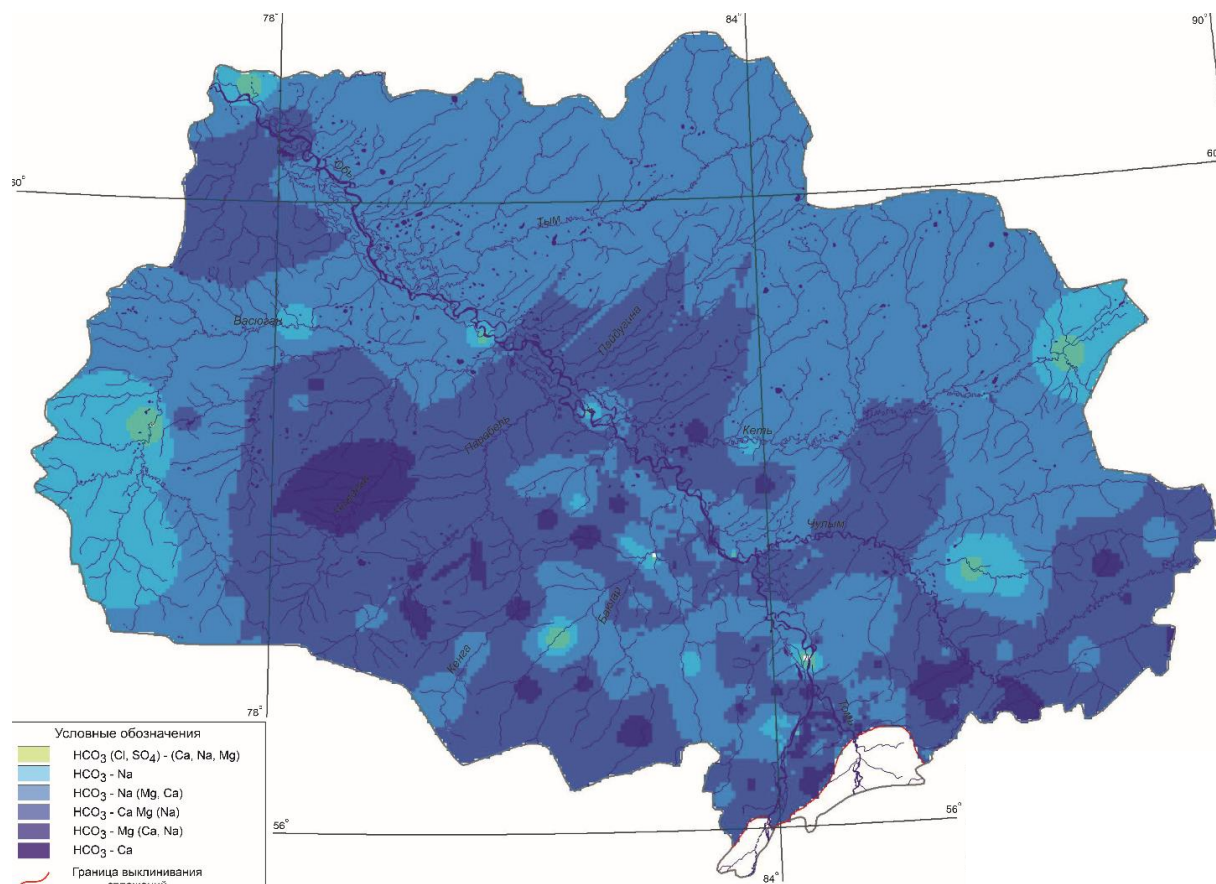


Рисунок – 46 Карта химических типов подземных вод палеогеновых отложений.

Концентрации хлоридов изменяются здесь от 30 до 300 мг/дм³ и более. Содержание органических веществ уменьшается с севера от 5 – 15 мгО₂/дм³ на юг до 2 – 5 мгО₂/дм³.

Большей частью подземные воды палеогеновых отложений слабокислые (рН 6,5 - 7,5) (рисунок 47). Слабощелочные воды (рН 7,5 - 8,5) отдельными обширными очагами тяготеют к центральным и южным районам исследуемой территории.

В северной части области встречаются локальные проявления кислых вод с рН 5,5 - 6,6.

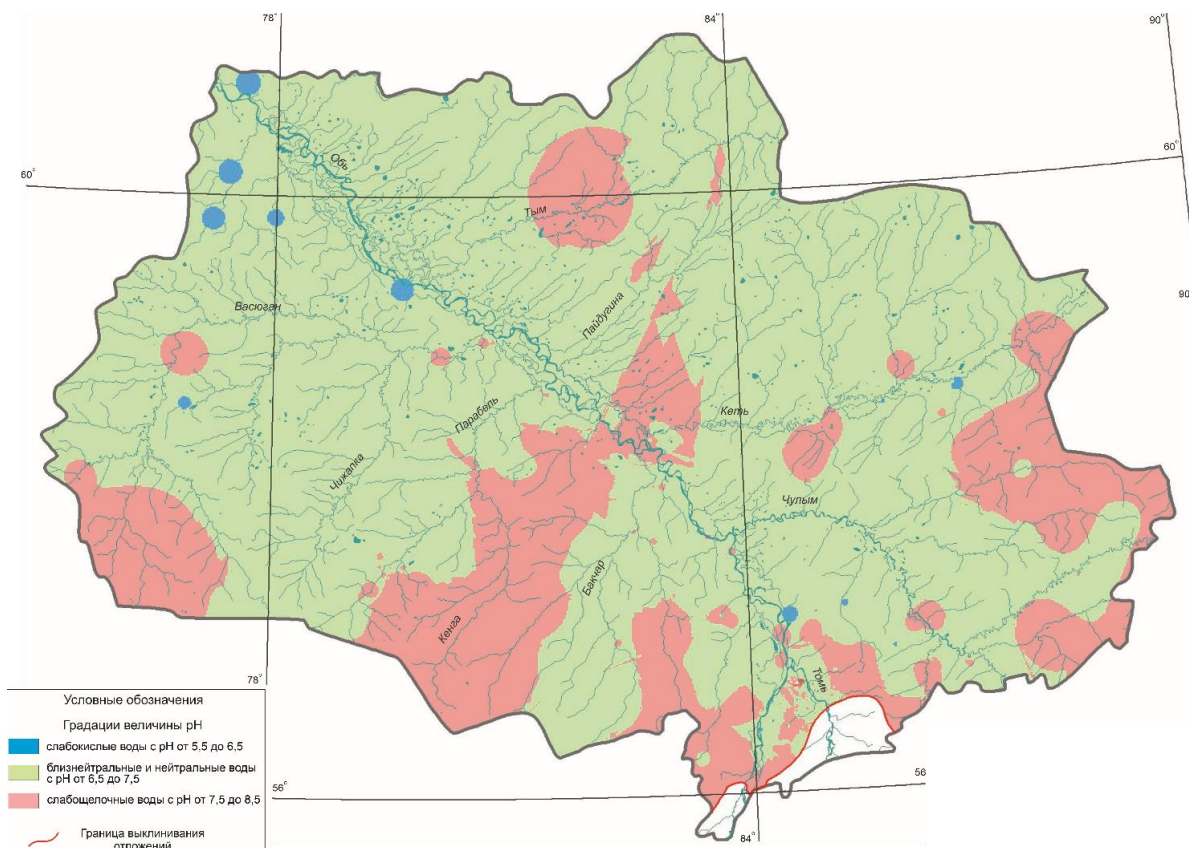


Рисунок – 47 Карта изменчивости рН подземных вод палеогеновых отложений

Для подземных вод палеогена характерно повсеместное присутствие железа и марганца с минимальными концентрациями, приуроченными к юго-восточным районам области (0,05 - 1,2 мг/дм³). Максимальные значения фиксируются в центральной части и на северных окраинах области (3 – 7 мг/дм³).

Формирование состава вод подземных вод палеогеновых отложений происходит в тесном взаимодействии и с ниже залегающими горизонтами. По крупным разломам в речных долинах наблюдается взаимодействие нижних с вышележащими горизонтами.

Для палеогенового водоносного комплекса отмечены локальные проявления вод с повышенной минерализацией. В центральной части области величина минерализации в отдельных скважинах достигает 1,5 г/л. Максимальная минерализация, достигающая 2,8 г/л, зафиксирована в скважинах, расположенных в районе устья р. Икса. По химическому составу воды преимущественно хлоридные натриевые, кальциево-натриевые.

Результаты морфоструктурно-гидрогеологического анализа позволяют локализовать зоны потенциальной разгрузки подземных вод залегающих ниже

водоносных горизонтов (рисунок 48). Справедливость применения такого методического подхода для прогнозных оценок эволюции химического состава при эксплуатации подземных вод на слабо изученных, в гидрогеологическом отношении территорий, подтверждается данными режимных гидрогеохимических наблюдений.

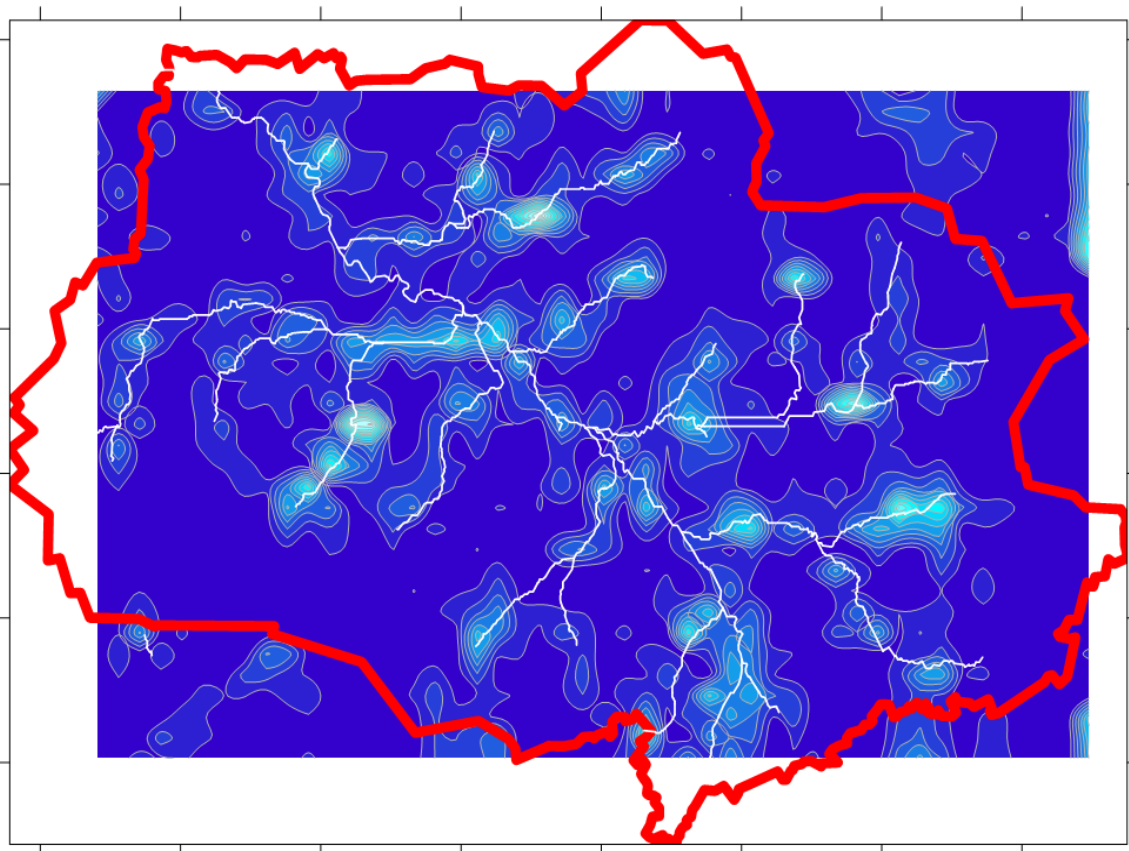


Рисунок – 48 Карта базисной поверхности речных долин четвёртого порядка (светлая тональность цветной заливки соответствует участкам разгрузки подземных вод)

Полученный нами картографический материал показывает, что площади зон потенциальной разгрузки вод ниже залегающих отложений, довольно значительны, охватывают не менее 10 % площади исследуемой территории.

Меловые отложения в пределах территории исследования имеют повсеместное распространение, залегают ниже отложений палеогенового комплекса и используются для хозяйственно-питьевых целей крайне ограниченно, в пределах юго-восточной части территории распространения [26 - 28]. Подземные воды комплекса характеризуются средней величиной минерализации на уровне 5

г/л (рисунок 49), в пределах области ее значения колеблются от 0,35 г/л до 35 г/л. Общая минерализация вод закономерно возрастает от краевых частей артезианского бассейна к его центру. Наименее минерализованные воды, до 0,5 г/л распространены в водах юго-восточной части. Далее в северо-западном направлении минерализация увеличивается, образуя вытянутые с юго-запада на северо-восток зоны с минерализацией 0,5-1 г/л, 1-3 г/л, 3-10 г/л. В северо-восточной части области встречается локальное проявление более низкой минерализации на уровне 1-3 г/л.

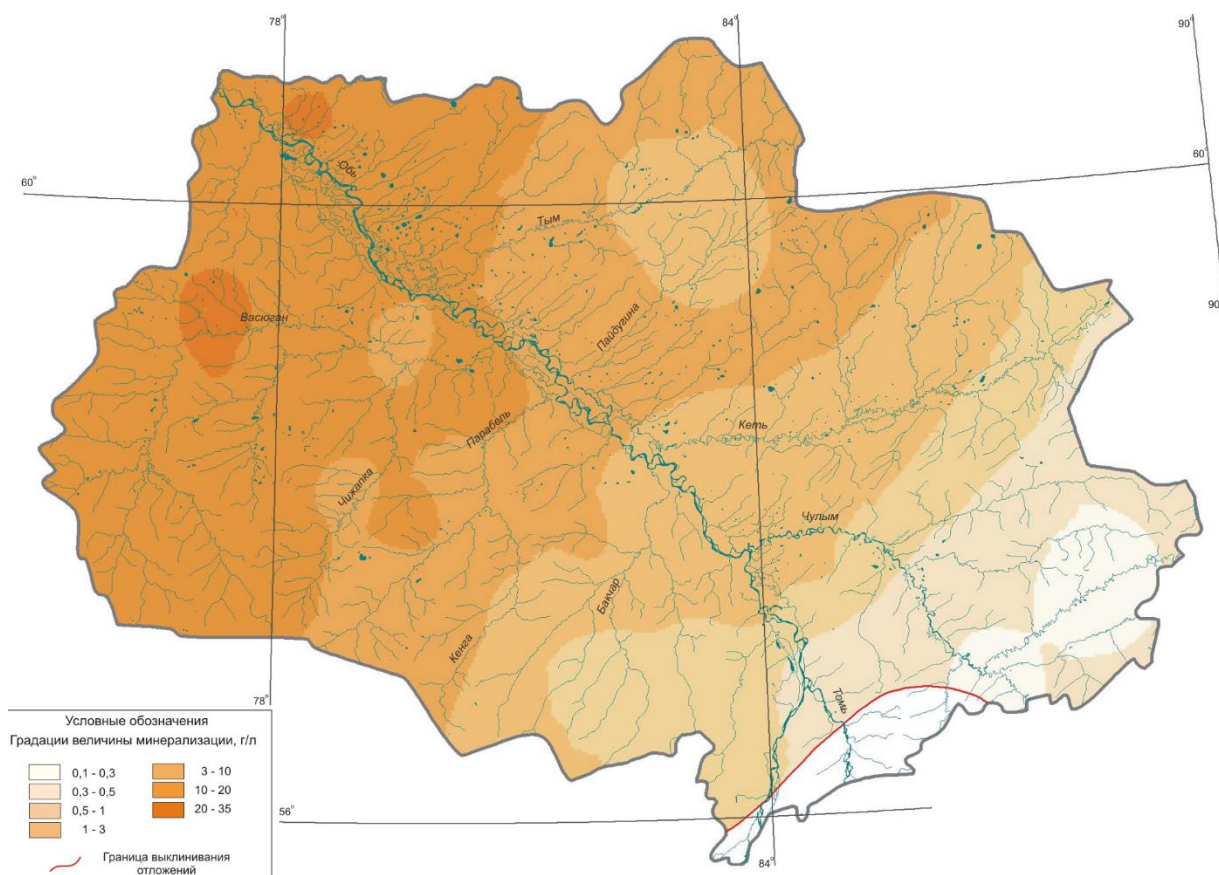


Рисунок – 49 Карта общей минерализации подземных вод меловых отложений

Средняя величина рН вод составляет 7,5 и варьируется от 6 - 6,5 на западе, северо-западе до 7,5 - 9,8 от центральной части до восточной и юго-восточной границы территории (рисунок 50).

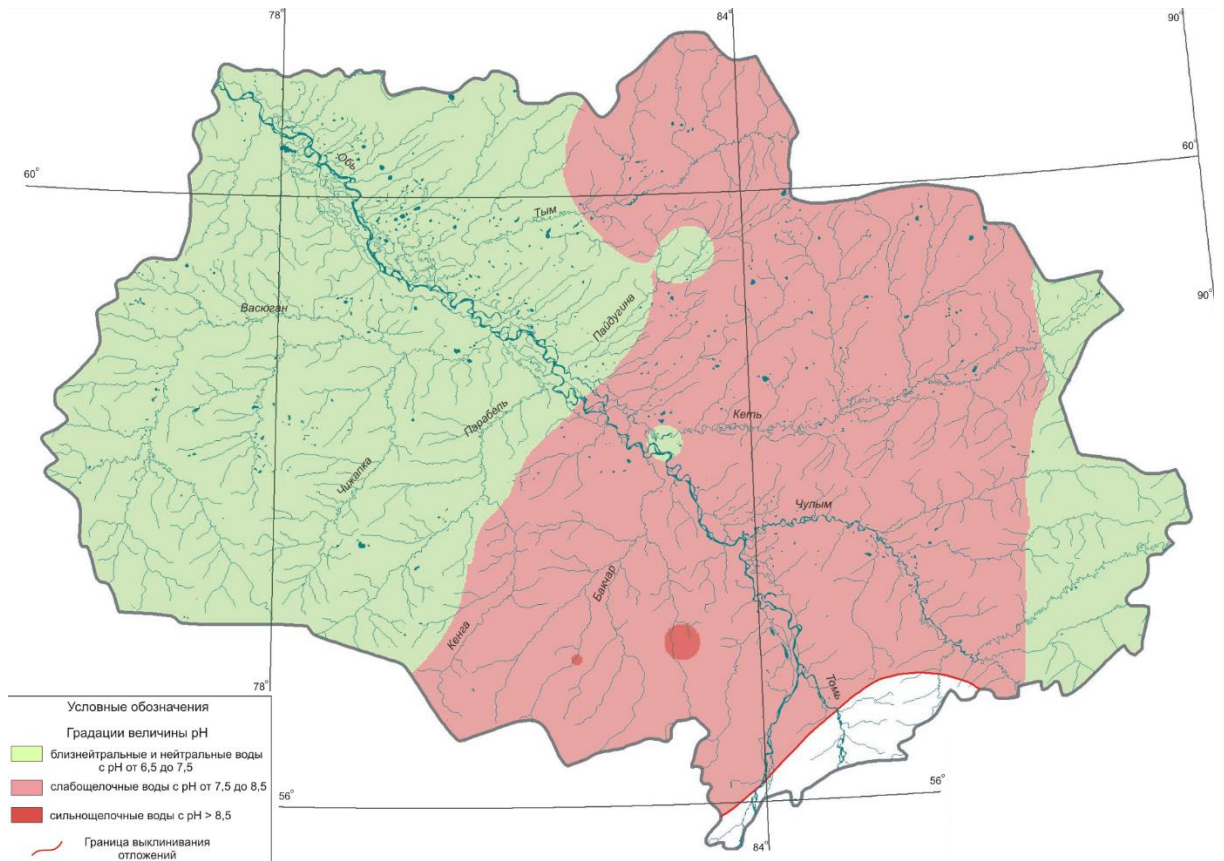


Рисунок – 50 Карта изменчивости рН подземных вод меловых отложений

По химическому составу (таблица 9) воды, в основном, хлоридно-натриевые. Содержание хлор-иона в среднем составляет 2,5 г/л, в отдельных скважинах - 17,9 г/л; средняя концентрация натрий-иона 1,4 г/л достигающего максимального значения около 9 г/л.

Таблица 9

Химический состав подземных вод меловых отложений

Показатель	Минимальное	Максимальное	Среднее арифметическое
Ca ²⁺ , мг/л	2	2505,00	247,62
Mg ²⁺ , мг/л	0	544,77	36,36
Na ⁺ , мг/л	3,91	8775	1426,69
K ⁺ , мг/л	0	2250	136,70
HCO ₃ ⁻ , мг/л	61	725,9	388,29
Cl ⁻ , мг/л	2,5	17902	2508,96
SO ₄ ²⁻ , мг/л	0	493	12,70
Общая минерализация, мг/л	365,55	29272,2	5120,77
рН, ед	6	9,85	7,51

В направлении от краевой части артезианского бассейна прослеживается определенная зональность в смене типов вод по их химическому составу, напрямую подчиняющуюся изменению их общей минерализации (рисунок 51)

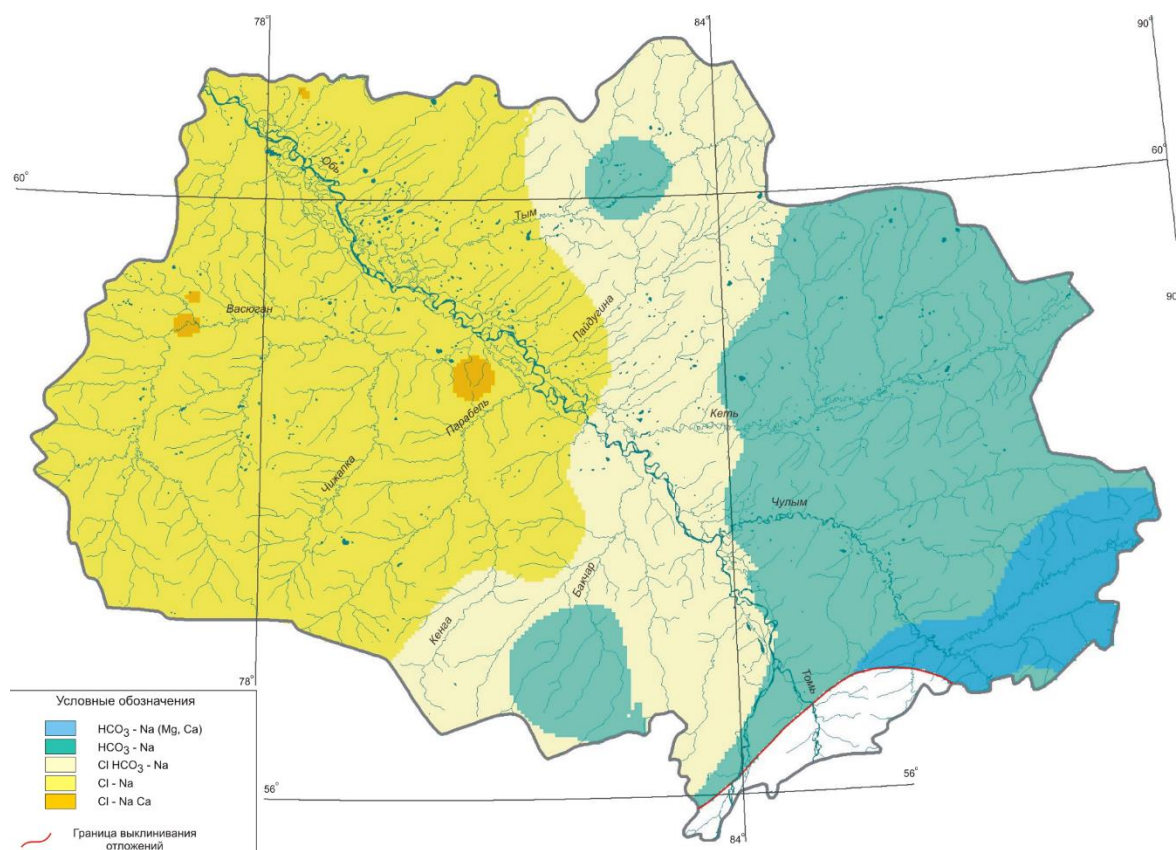


Рисунок – 51 Карта химических типов вод меловых отложений

Практически, вся восточная часть области характеризуется гидрокарбонатно-натриевым составом, в юго-восточной части преобладают гидрокарбонатные натриево-магниевые-кальциевые воды. В центре области широкой полосой с севера на юг протянулась зона распространения хлоридно-гидрокарбонатных натриевых вод. Лишь на отдельных участках, на севере и на юге зоны, воды гидрокарбонатно-натриевые. Воды обширной западной части области, приближенной к центральной части артезианского бассейна, характеризуются хлоридно-натриевым составом, на локальных участках хлоридным натриево-кальциевым.

Химический состав и качество подземных вод палеогеновых отложений, используемых на большей части территории Томской области, как основной источник хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, формируется под влиянием ландшафтно-климатических условий, литологического состава пород водоносного комплекса и перекрывающих отложений. Наименее

минерализованные воды формируются в условиях среднетаежных ландшафтов, отложениях континентального генезиса, перекрытых преимущественно песчаными, супесчаными осадками (10 % площади), а наиболее минерализованные воды в условиях южно-таежных ландшафтов, отложениях прибрежно-морского, морского генезиса, перекрытых преимущественно глинистыми и суглинистыми осадками (10 % площади). Для остальных территорий (75 %) характерны промежуточные величины минерализации. Локально по крупным разломам в речных долинах, площадь, которых, по проведенным морфоструктурно-гидрогеологическим построениям, оценивается 10 %, наблюдается разгрузка вод ниже залегающих меловых отложений, проявляющаяся азональными аномалиями хлоридов и повышенной минерализации, закартированная площадь которых порядка 5 %.

5.2. Геохимические особенности месторождений подземных вод

При переходе на подземное водоснабжение экологическая напряженность жизнеобеспечения населения существенно снижается, но не устраняется полностью, продолжая требовать внимания. При водоснабжении из подземных источников, практически, минимизируются проблемы типичного антропогенного загрязнения, вопросы же изменения состава вод при эксплуатации не снимаются.

Причин изменения качества питьевых подземных вод достаточно много. На формирование пресных вод существенное влияние оказывают ландшафтно-климатические факторы, а пресные воды обычно залегают в зоне интенсивного водообмена и подвержены воздействию сезонных изменений, то соответствующие причины обязаны иметь место и на водозаборах. Еще более значимы вариации, обусловленные пространственной изменчивостью факторов и отражающих очень сложную структуру недр. Даже в относительно простых гидрогеологических условиях (платформенный тип разреза, единый достаточно выдержанный водоносный горизонт) значения многих компонентов состава воды по площади месторождения могут изменяться в несколько раз. Ситуация будет еще более сложной, если принять во внимание взаимодействие выше- и нижележащих горизонтов и их гидрогеохимические особенности. Депрессионная нагрузка на

недра резко изменяет их гидродинамическую структуру, вызывая перетоки более пресных вод из верхних горизонтов, так подток более минерализованных вод из застойных зон, или соленых вод из глубоких горизонтов, активизацию разнообразных геохимических процессов и другие следствия. Весьма проблематична и эксплуатация месторождений в пиритизированных толщах горно-складчатых сооружений.

Нами для выяснения особенностей изменения состава и качества подземных вод палеогеновых отложений Западно-Сибирского артезианского бассейна были выбраны три типовых эксплуатируемых месторождения подземных вод, использующихся для водоснабжения гг. Стрежевого, Томска и Северска.

Работа водозабора г. Стрежевого характеризует типовые условия техногенных процессов, возникающих при добыче подземных вод хозяйственно-питьевого назначения на многочисленных месторождениях подземных вод, расположенных в ландшафтных условиях средней тайги с повышенной заболоченностью, а водозаборы гг. Томска и Северска в ландшафтных условиях южной тайги. Более того водозабор г. Томска находится в условиях слияния двух крупных рек, где еще до начала его работы в естественных условиях наблюдалось разгрузка меловых солоноватых вод в выше залегающие палеогеновые отложения, а при эксплуатации водозабора № 1 г. Северска, имеются свидетельства инфильтрационного загрязнения.

На юге области, в пределах структур АСО, где палеогеновые отложения отсутствуют, интенсивно эксплуатируются подземные воды комплекса палеозойских образований, являющимся здесь единственным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения. Поэтому нами для этих условий было выбрано Академическое месторождение, как типичный представитель водозаборов, эксплуатирующих подземные воды этого водоносного комплекса.

Задача нашего исследования заключается не столько в детальнейшем анализе изменений по всем указанным объектам, что и невозможно, так как каждый из них заслуживает самостоятельного и подробного рассмотрения и соответствующей работы, сколько в выявлении некоторых общих тенденций, которые мы впервые

замечены нами или описаны предыдущими поколениями специалистов, эксплуатирующих и изучавших данные месторождения.

5.2.1. Геохимические условия Стрежевского месторождения подземных вод

Стрежевское месторождение подземных вод разведано для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения населения одноименного города Стрежевого. Месторождение находится вблизи северо-восточной окраины города. Для эксплуатации используются подземные воды палеогеновых отложений новомихайловской, атлымской и тавдинской свит. Схема водозабора представляет собой площадную систему, которая состоит из 21-ой наблюдательной и 17-ти эксплуатационных скважин. (рисунок 52).

Водозабор существует с 1973 г. За время эксплуатации общий годовой водоотбор изменялся. В период с начала 70-х гг. он составлял около 1096 м³/сут. Затем повышался до конца 90-х гг., когда максимум составил свыше 12000 м³/сут. Затем общий водоотбор постепенно снижался и в настоящее время составляет порядка 5000 м³/сут.

Общее представление о гидрогеологическом разрезе месторождения показано на рисунке 53. Основные эксплуатируемые горизонты отложений атлымской и новомихайловской свиты гидравлически связанные друг с другом, представлены песками с линзами глин, бурых углей и лигнитов. Породы тавдинской свиты, по сравнению с отложениями атлымской и новомихайловской свит, существенно в большей степени обогащены органикой. На глубинах порядка 150 – 250 м, водоносные отложения разделены водоупором многолетнемерзлых пород.

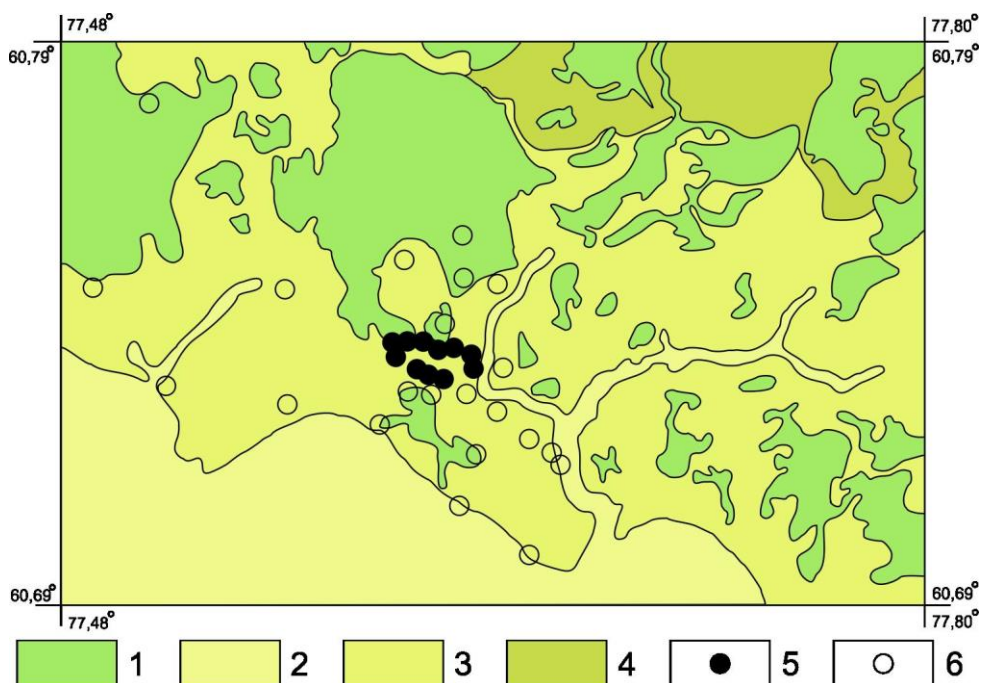


Рисунок – 52 Схематическая гидрогеологическая карта района Стрежевского месторождения подземных вод: Водоносные горизонты: 1 – современных аллювиальных отложений; 2 – современных болотных отложений; 3 – аллювиальных отложений второй надпойменной террасы; 4 – аллювиальных отложений второй надпойменной террасы. Скважины: 5 – эксплуатационная; 6 – наблюдательная.

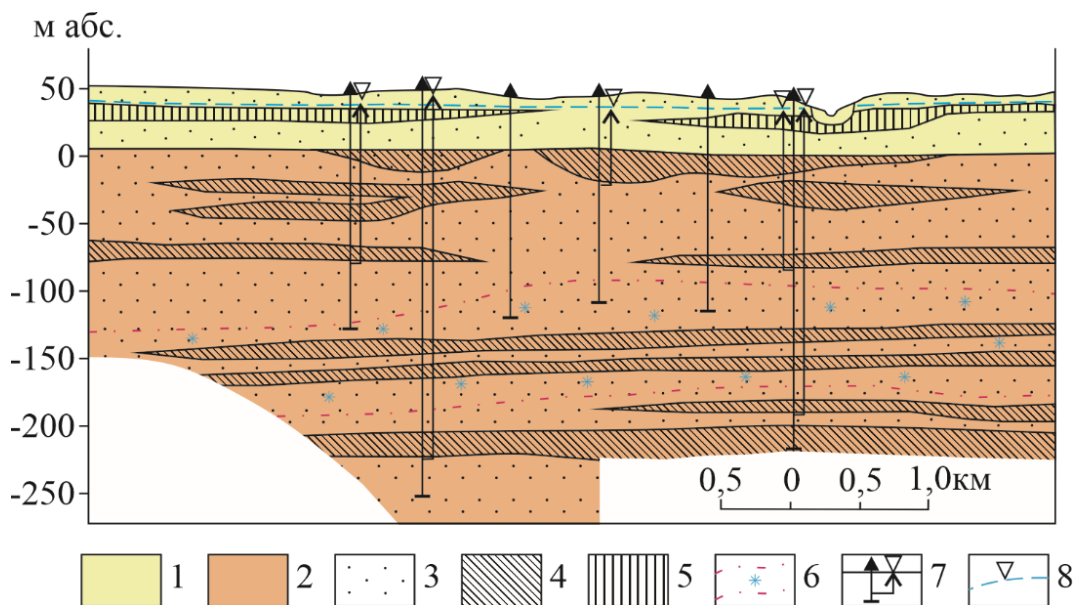


Рисунок – 53 Схематический разрез Стрежевского месторождения подземных вод: водоносные комплексы: 1 – четвертичных отложений; 2 – палеогеновых отложений; литологический состав: 3 – пески; 4 – глины; 5 – суглинки; 6 – многолетнемерзлые породы; 7, 8 – эксплуатационные скважины и уровни подземных вод

Химический состав вод эксплуатируемых отложений типичен для подземных вод, формирующихся в ландшафтно-климатических условиях средней тайги. Они ультрапресные, умеренно пресные, гидрокарбонатные кальциевые, кальциево-магниевые, умеренно жесткие.

За длительный период работы водозабора по данным ООО «Томскгеомониторинг» в эксплуатационном водоносном комплексе палеогеновых отложений сформировалась депрессионная воронка, границы распространения которой не могут быть точно определены из-за недостаточного количества наблюдательных скважин за пределами площади водозаборного участка. Уменьшение водоотбора сказалось на положении уровня подземных вод эксплуатируемого водоносного комплекса. Так, например, общая сработка пьезометрической поверхности в 2000 году изменялась по площади водозабора от 1,0 до 6,85 м и уменьшилась по сравнению с предшествующим годом на 0,14 - 0,71 м. В верхнем водоносном горизонте верхнеолигоценовых отложений трайгородской свиты и верхнечетвертичных отложений второй надпойменной террасы р. Оби общее снижение уровня в пределах водозабора за этот период изменялось от 0,71 до 1,68 м.

Анализ изменения гидрогеологических условий месторождения подземных вод под влиянием длительной эксплуатации показывает наличие устойчивых тенденций в проявлении гидродинамического и гидрогеохимического режимов подземных вод.

Исходный материал, на основе которого сделаны эти выводы, представлен данными многолетних режимных наблюдений, включающими фактические замеры динамических уровней подземных вод и результаты систематического опробования их химического состава по эксплуатационным и режимным скважинам водозабора.

Динамика изменения уровенного режима подземных вод под воздействием эксплуатации, отражает общие закономерности формирования понижения в границах депрессивной воронки и связана с характером изменения нагрузки на

водозаборные скважины под влиянием водоотбора, то есть полностью объясняется техногенным фактором.

За время работы водозабора отмечается изменение нагрузки на скважины, которое в свою очередь тесно связано с величиной водоотбора и оказывает решающее влияние на динамические уровни пьезометрической поверхности и формирование ее понижения.

В режиме эксплуатации водозабора можно выделить два основных этапа. Первый этап соответствует периоду наращивания фонда эксплуатационных (водозаборных) скважин. Он заканчивается в 1989 году. После этого работа водозабора характеризуется активным перераспределением нагрузки между существующими водозаборными скважинами. Иногда отдельные скважины временно выводятся из эксплуатации. По наблюдательным скважинным отмечается интенсивный рост глубины динамических уровней на первом этапе, а на втором этапе достигается некоторая стабилизация депрессионной воронки.

Самые сильные изменения динамических уровней по отдельным эксплуатационным скважинам фиксируются на втором этапе эксплуатации водозабора. В это время работа скважин характеризуется максимальными амплитудами величины действующего напора, интенсифицирующей процессы вертикальных перетоков за счет формирования привлекаемых ресурсов из вышележащего водоносного горизонта неоген-четвертичных отложений.

Эти особенности эксплуатации водозабора оказывают существенное влияние на изменение в химическом составе подземных вод. По данным режимных наблюдений установлена зависимость между изменением концентрации ионов железа (рисунок 54) и величиной водородного показателя рН (рисунок 55). Обобщенные данные по всем скважинам водозабора показывают, что с уменьшением величины водородного показателя рН за счет подкисления подземных вод эксплуатационного водоносного горизонта фильтрационным потоком перетекания сверху, наблюдается рост концентрации ионов железа.

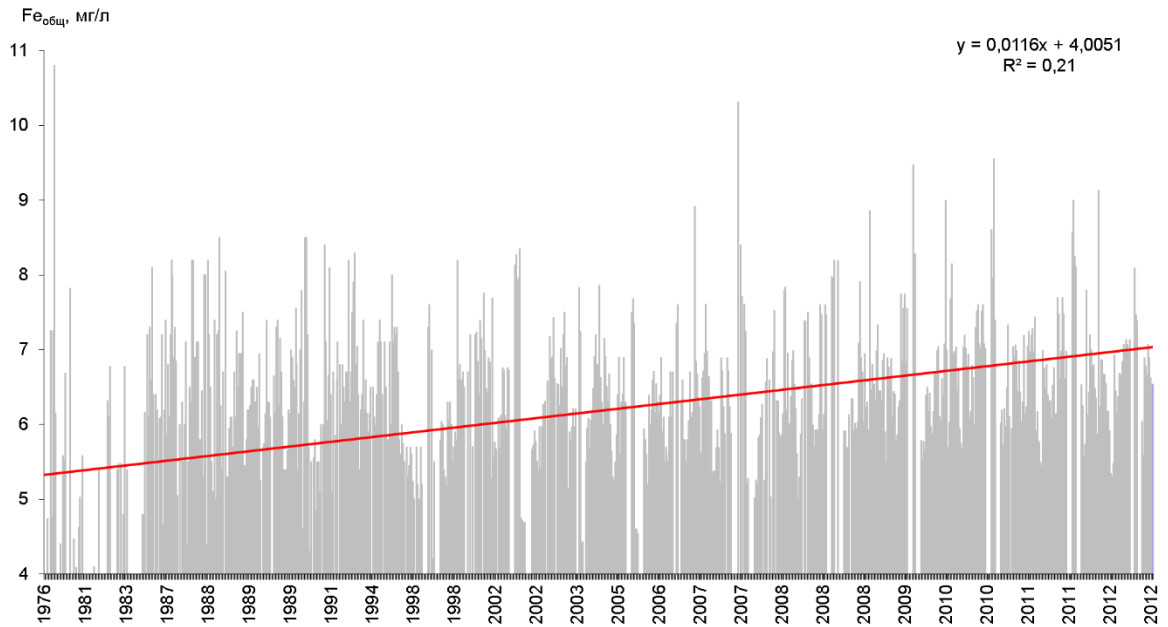


Рисунок – 54 Изменение содержания железа в подземных водах при эксплуатации водозабора.

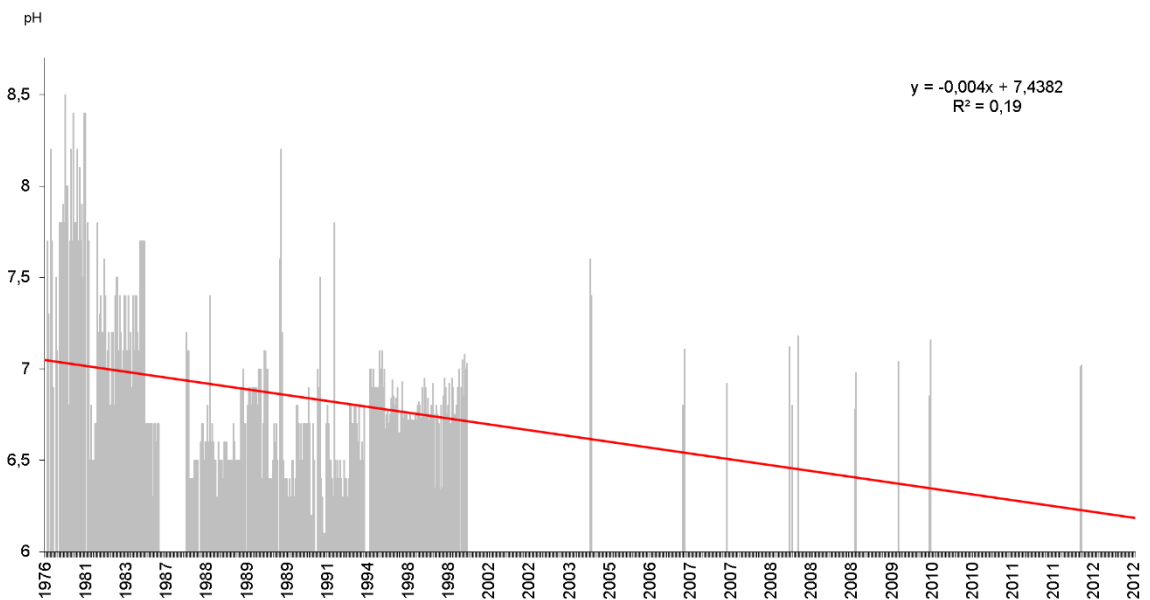


Рисунок – 55 Изменение величины pH в подземных водах за время эксплуатации водозабора.

Выявленная тенденция в поведении концентрации железа может объясняться тем, что при формировании депрессионной воронки в процессе эксплуатации водозабора, возникает и сохраняется во времени своеобразный геохимический барьер за счет подтягивания кислых подземных вод из поверхностного водоносного горизонта, химический состав которого формируется под выраженным влиянием болотных вод с низким значением водородного показателя

pH. Таким образом, формируются благоприятные условия для роста концентрации ионов железа в растворенной форме. В условиях работы водозабора доля кислых болотных вод, имеющих весьма широкое распространение в районе водозаборного участка (см. рисунок 52), поддается количественной оценке, которая может быть получена с использованием численного моделирования.

Анализ химического состава по отдельным водозаборным скважинам показывает, что выявленная тенденция в поведении концентрации железа изменяется по площади водозаборного участка. Скорее всего это может быть связано с неоднородностью геологического разреза и формированием сложного характера процессов вертикального перетекания за счет литологических окон в отдельных толщах, или, наоборот, увеличения мощности водоупоров на отдельных локальных участках.

Выявленные, по результатам режимных наблюдений, закономерности изменений химического состава подземных вод позволяют с большой долей вероятности предположить наличие тесной связи между гидрогеохимическим режимом подземных вод и интенсивностью эксплуатации месторождения. Для количественной оценки этой связи нами предпринята попытка исследовать гидрогеологические условия эксплуатации подземных вод с использованием гидродинамического моделирования. Главной задачей при этом является вопрос количественной оценки вероятного процесса смешения подземных вод, поступающих из приповерхностных частей гидрогеологического разреза на глубину заложения фильтров эксплуатационных скважин. С точки зрения оценки качества подземных вод процессы смешения могут иметь решающее значение. Подземные воды в приповерхностных условиях насыщены органическими соединениями, имеют кислую реакцию среды и, за счёт этого, способны влиять на устойчивость органоминеральных комплексных соединений железа, удерживая его ионы в растворе. Такое техногенное изменение геохимической обстановки может существенно снижать эффективность мероприятий по снижению концентрации (растворенных форм) железа в технологическом процессе водоподготовки.

Условия применения гидродинамического моделирования сильно ограничены дефицитом имеющейся гидрогеологической информации для полноценной модели водозабора, но позволяют дать обобщенную оценку изменения гидрогеологических условий под влиянием эксплуатации на основе водного баланса. В такой постановке гидрогеологические условия воспроизводятся в обобщенном виде, где ведущим фактором искусственного воздействия выступает суммарный водоотбор с условно равномерным распределением нагрузки на эксплуатационные скважины.

Водовмещающая толща представлена породами, имеющими слоистое строение с выделением водоносных комплексов четвертичного и палеогенового возраста. Работа эксплуатационных скважин задана в фиктивном слое в средней части водоносного горизонта палеогеновых отложений мощностью 15 м, отвечающей длине рабочей части фильтров. Размеры области фильтрации (160×120 км) выбирались с таким расчётом, чтобы возмущение от работы водозабора не достигало внешних контуров модели. Кровля верхнего слоя соответствует цифровой модели рельефа SRTM30 (рисунок 56). Отметки подошвы основной эксплуатационной толщи отложений новомихайловской и атлымской свит, совпадают с отметками кровли тавдинской свиты, импортированными из соответствующего покрытия электронной геологической карты масштаба 1:1000000. Из этого же источника получены данные о суммарной мощности отложений новомихайловской и атлымской свит, которые были пересчитаны в абсолютные отметки их кровли. В результате схематизации гидрогеологических условий получена шестислойная численная модель области фильтрации (рисунок 57, 58).

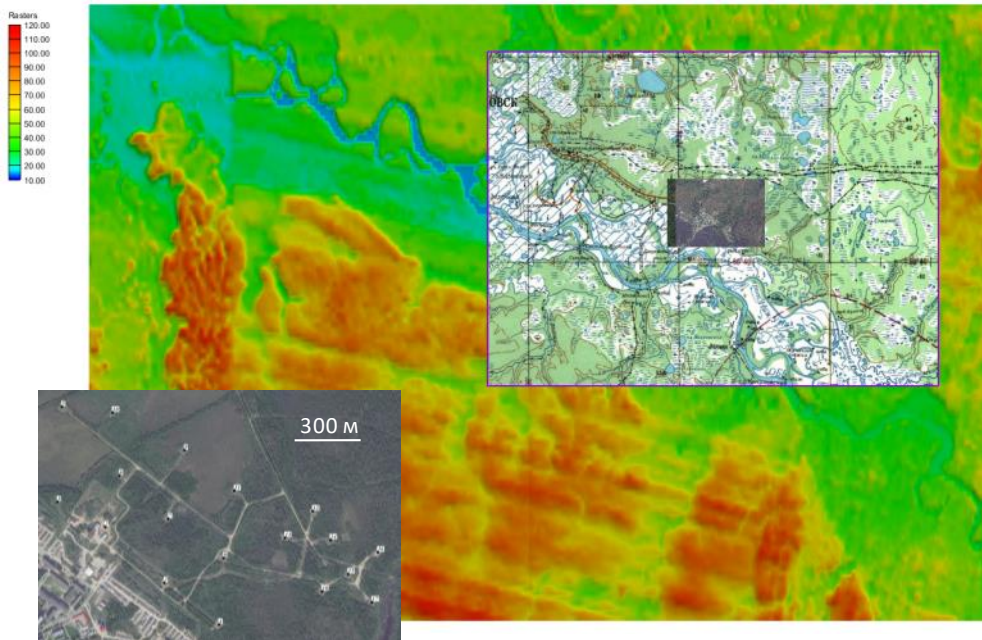
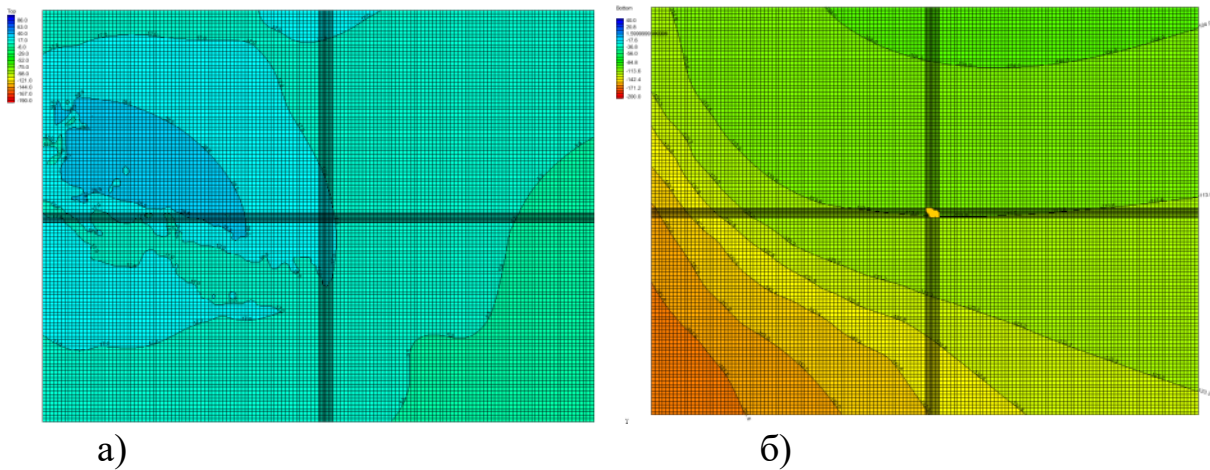


Рисунок – 56 Совмещенные слои топографической основы, цифровой модели рельефа, границ конечно-разностной сетки численной модели области фильтрации (синий контур) и космоснимка, использованного для привязки водозаборных скважин (врезка)



а) б)
Рисунок – 57 Абсолютные отметки кровли (а) и подошвы (б) толщи новомихайловской и атлымской свит

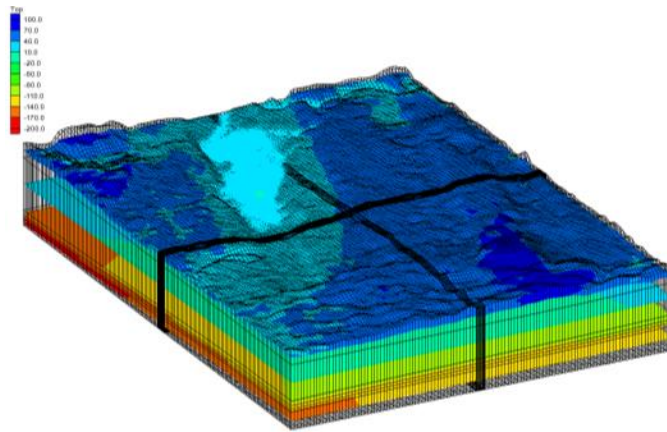


Рисунок – 58 Конечно-разностная сетка численной модели области фильтрации (сетка имеет более плотную разбивку в границах водозаборного участка, вертикальный масштаб для наглядности увеличен)

Моделирование выполнялось поэтапно, с последовательным усложнением строения модели. Адекватность модели оценивалась упрощенно по величинам понижений в расчётных блоках с нагрузкой. В качестве критерия точности модели принималась близость расчетных понижений к измеренным уровням в эксплуатационных скважинах. Предварительные численные эксперименты показали необходимость учёта на модели питающих границ.

На первом этапе граничные условия были представлены только поверхностными водами р. Оби и площадным инфильтрационным питанием, поступающим в первый (верхний) слой модели с интенсивностью, заданной пропорционально величине доли атмосферных осадков, идущих на восполнение запасов подземных вод.

Результаты моделирования показывают (рисунок 59), что возмущение от эксплуатационных скважин резко ограничивается по площади влиянием русла р. Оби, но распространяется на большое расстояние вверх по направлению естественного фильтрационного потока.

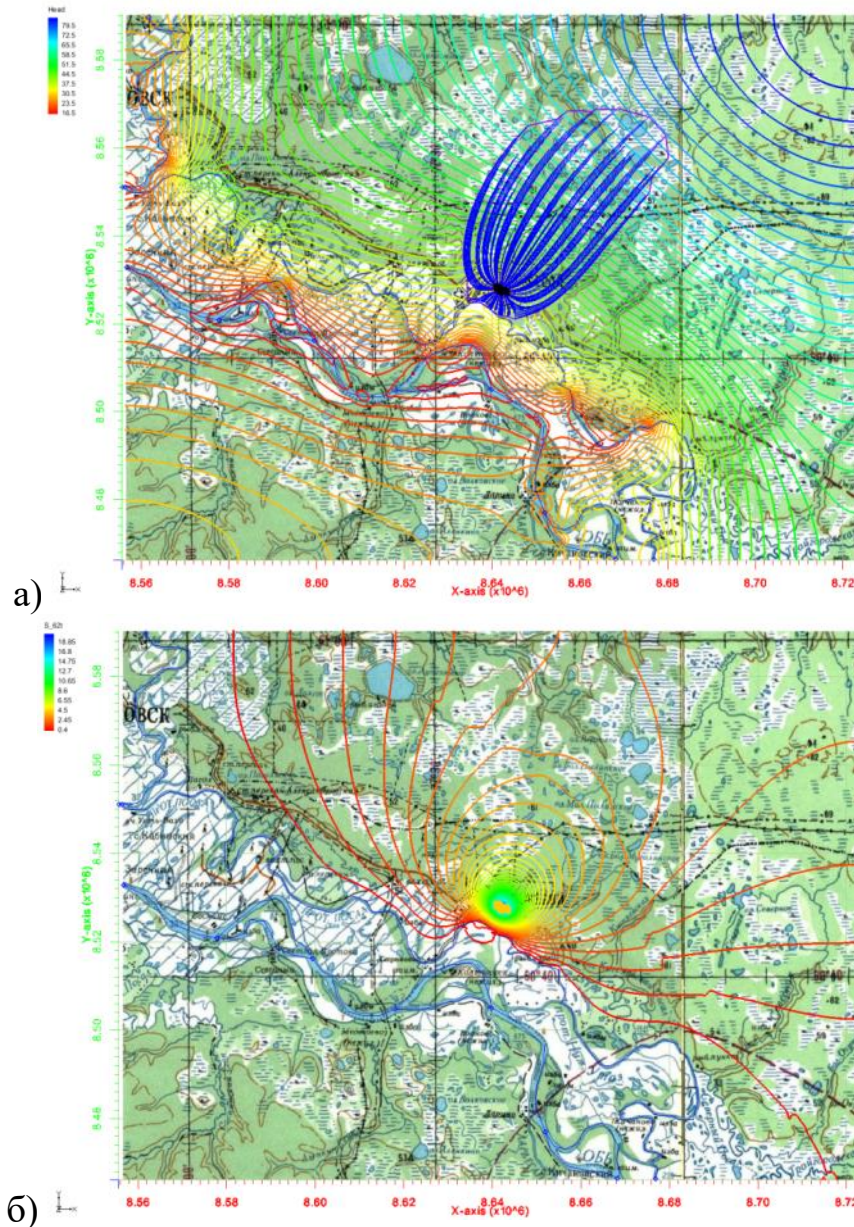


Рисунок – 59 Расчётное поле напоров (а) и понижения уровня (б) в третьем слое модели (с фильтрами водозаборных скважин) и предельный размер зоны захвата фильтрационного потока эксплуатационными скважинами

С точки зрения схематизации гидрогеологических условий, такой вариант модели требует уточнения, поскольку иные поверхностные водные объекты (многочисленные озера и болотные массивы) по характеру гидравлической связи с приповерхностными водоносными горизонтами не отличаются от главной реки, реализованной в виде внутренних граничных условий области фильтрации.

Уточненный вариант численной модели дополнительно учитывает наличие крупных болотных массивов (рисунок 60).

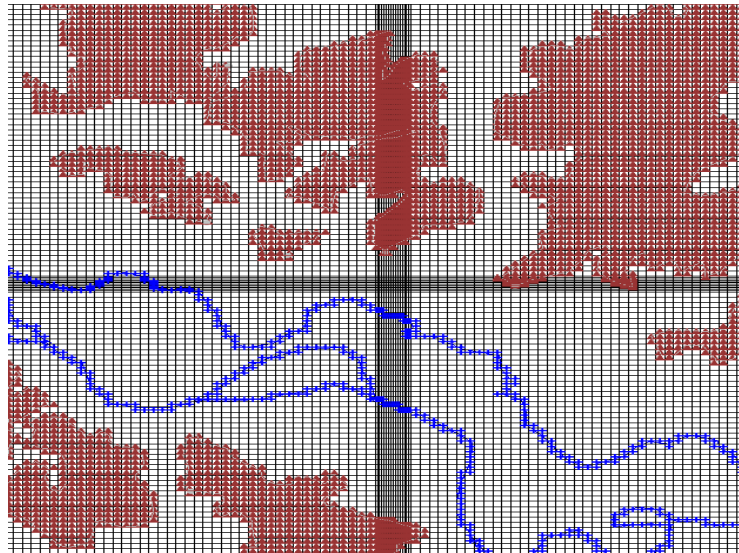


Рисунок – 60 Граничные условия, заданные в верхнем слое модели
(линейные – реки, площадные – крупные болотные массивы)

На модели воспроизведена работа водозабора в стационарном режиме фильтрации с максимальной производительностью ($32000 \text{ м}^3/\text{сут}$). Результаты в виде структуры фильтрационных потоков на фоне топографической карты показаны на рисунке 61. Характерные размеры линий тока приведены в таблице 10.

Расчеты показывают, что предельный размер зоны захвата потока (площади депрессионной воронки) существенно ограничивается при комплексном влиянии всех видов питающих границ первого слоя численной модели.

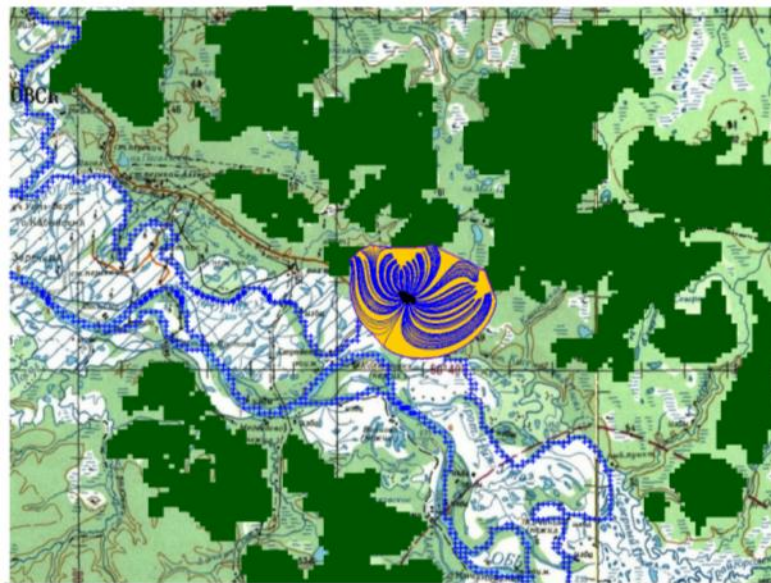


Рисунок – 61 Предельные размеры зоны захвата фильтрационного потока при наличии интенсивного инфильтрационного питания

Параметры линий тока в границах области захвата при наличии интенсивного инфильтрационного питания

Показатель	Длина, м	Время, сут	Время, год	Скорость, м/сут
мин.	5067,19	86788,5	237,78	0,058
макс.	44213	12658000	34679,45	0,003
среднее	13160,2	872251	2389,73	0,015

Темпы продвижения подземных вод по эксплуатационному водоносному комплексу по направлению к скважинам неравномерны, изменяются в соответствии с переменной величиной гидравлического уклона и могут быть показаны на схеме линий тока, построенной с использованием возможностей модуля MODPATH (рисунок 62).

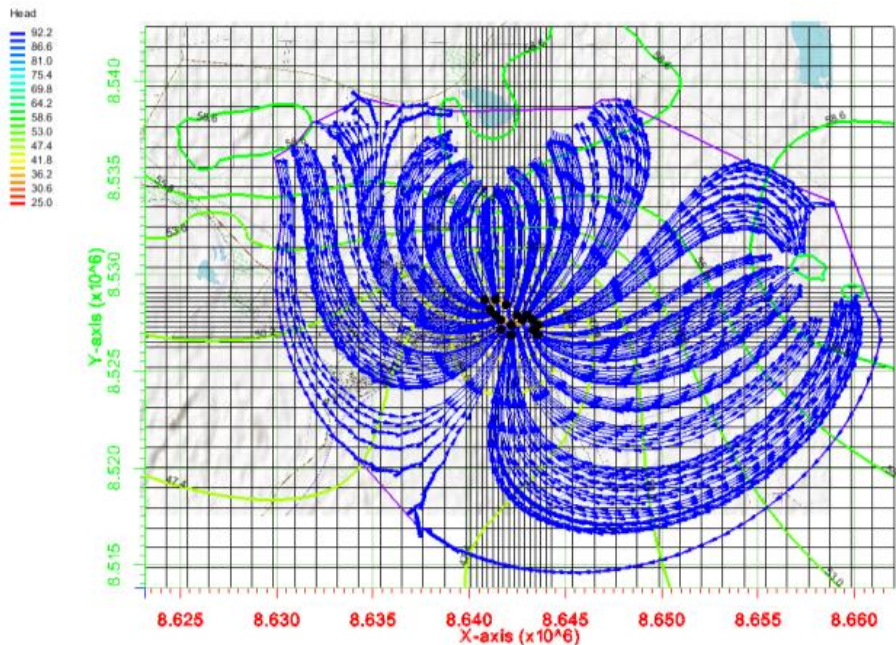


Рисунок – 62 Темпы движения подземных по направлению к водозаборным скважинам (расстояние между стрелками соответствует времени 100000 сут или 273 года)

Для расчётного срока работы водозабора в течение 10000 сут предельные размеры зоны захвата фильтрационного потока практически не выходит за границы водозаборного участка (рисунок 63, таблица 11). Однако, юго-западная часть 3-го пояса зоны санитарной охраны водозабора захватывает часть городской застройки, где сосредоточены гаражные комплексы.

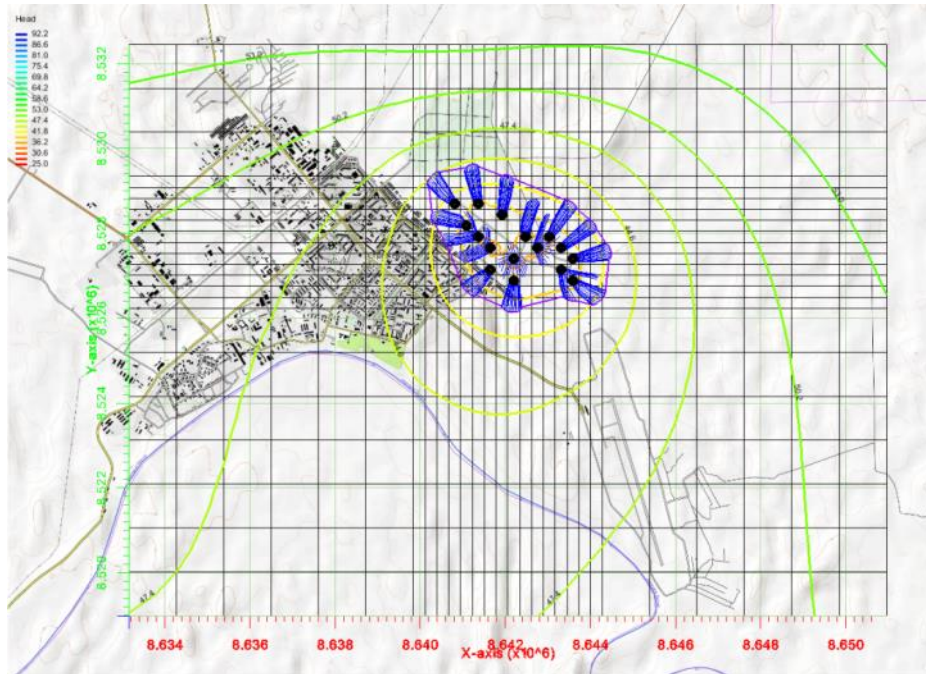


Рисунок – 63 Размеры зоны захвата фильтрационного потока на расчётный срок 10000 суток при суммарной производительности 32000 м³/сут

Таблица 11

Параметры линий тока в границах области захвата на расчетный срок 10000 сут. при суммарной производительности 32000 м³/сут.

Показатель	Длина, м	Время, сут	Время, год	Скорость, м/сут
мин.	156,00	10000	27,4	0,016
макс.	935,55	10000	27,4	0,094
среднее	755,73	10000	27,4	0,076

Выполненное моделирование позволяет дать оценку балансовых характеристик фильтрационных потоков по трём верхним слоям численной модели, которые приведены в таблице 12. Результаты этих расчётов необходимы для обоснования физико-химических расчётов.

Результаты численного гидродинамического моделирования показывают, что с поверхности во второй слой модели попадает расход подземных вод в количестве 2929,4 м³/сут близких по геохимическому облику к поверхностным водам, формирующимся в значительной степени под влиянием болотных массивов.

С учетом суммарного расхода водозабора интенсивностью 32000 м³/сут доля поверхностных вод может достигать 9%.

Балансовые характеристики выделенного участка по трём верхним слоям модели при суммарной производительности водозабора 32000 м³/сут (фильтры эксплуатационных скважин расположены в 3-ем слое)

Направление притока	1-ый слой		2-ой слой		3-ий слой	
	приход	расход	приход	расход	приход	расход
справа	661,9	0	6025,9	0	793,0	0
спереди	155,2	-0,8	2562,1	-19,1	326,2	-2,4
снизу	94,6	-2929,4	66,1	-28334,9	445,6	-14,4
слева	189,9	0	2882,6	0	362,0	0
сверху	0	0	2929,4	-94,6	28334,89	-66,1
сзади	1828,7	0	13982,8	0	1820,7	0

Опыт эксплуатации водозабора показывает, что его реальная производительность значительно меньше объёмов утвержденных запасов подземных вод (32000 м³/сут). Она неравномерно изменялась за время работы водозабора (рисунок 64), достигая максимума в 1996 году при дебите 12340 м³/сут.

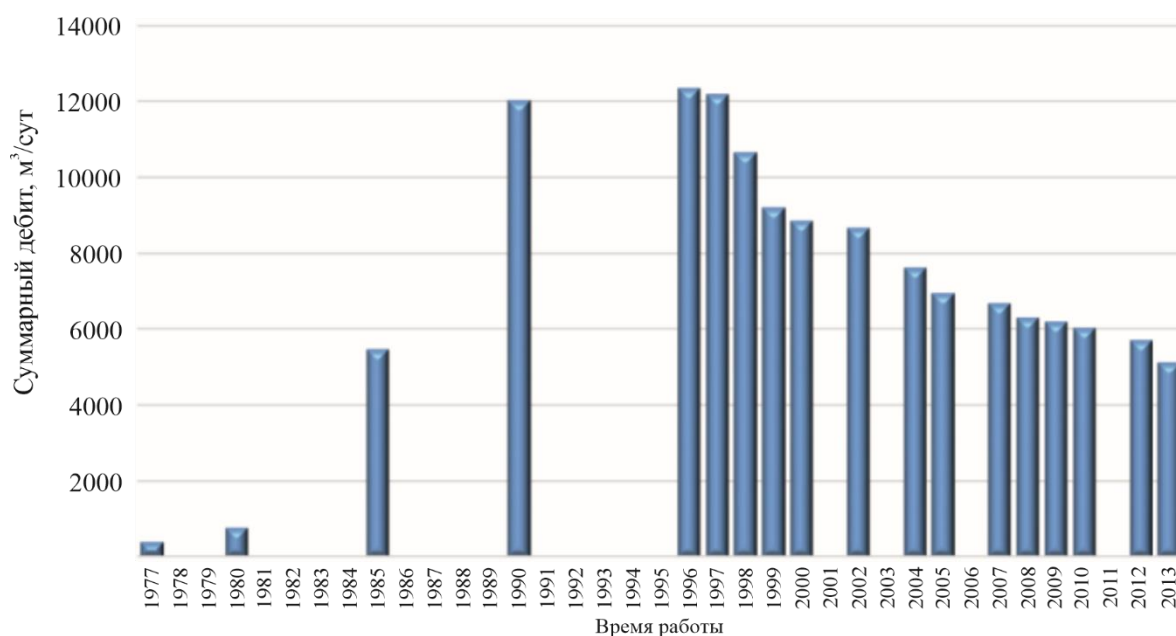


Рисунок – 64 Изменение производительности водозабора за время эксплуатации

На сегодняшний день суммарная производительность эксплуатационных скважин находится на уровне 5100 м³/сут. В этих условиях нами выполнена прогнозная оценка работы водозабора при существующей интенсивности водоотбора.

Результаты моделирования показывают, что при расходе водозабора 5120 м³/сут существенно сокращается предельная область захвата фильтрационного потока (рисунок 65).

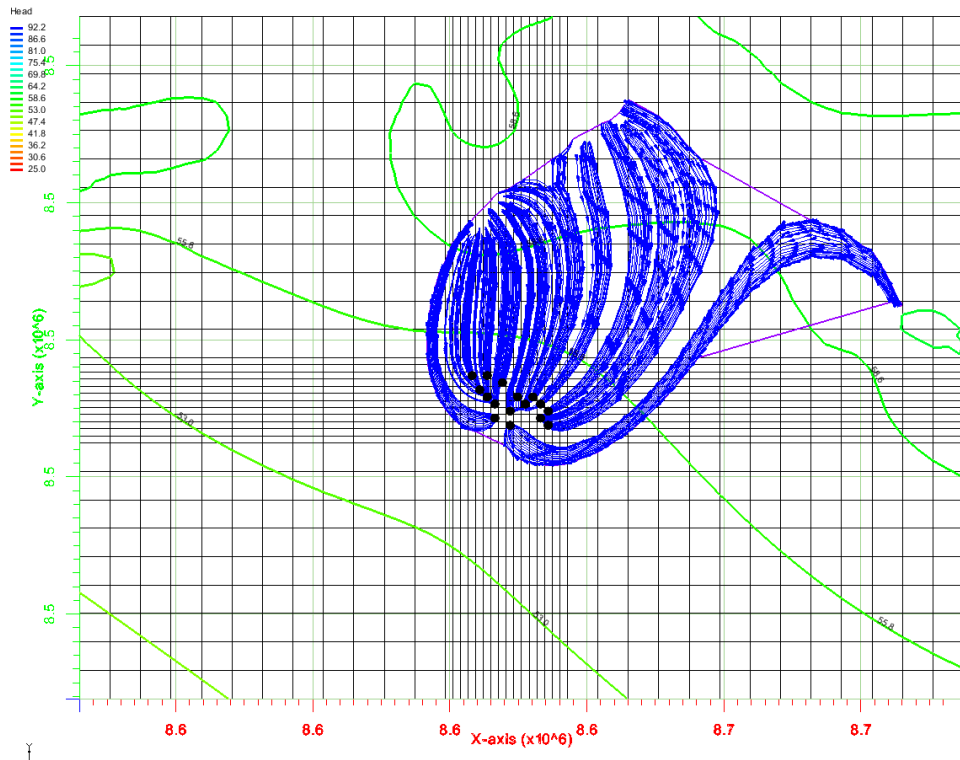


Рисунок – 65 Предельные размеры зоны захвата фильтрационного потока и темпы движения подземных вод по направлению к водозаборным скважинам (расстояние между стрелками соответствует времени 100000 сут или 274 года) при уменьшении производительности водозабора до 5120 м³/сут

Более наглядно это сокращение проявляется для зоны захвата фильтрационного потока на расчетных срок 10000 сут, которая, практически, не выходит за границы площади расположения водозаборных скважин. (рисунок 66, таблица 13).



Рисунок – 66 Размеры зоны захвата фильтрационного потока на расчётный срок 10000 суток при суммарной производительности 5120 м³/сут

Таблица 13

Параметры линий тока в границах области захвата на расчетный срок 10000 сут при суммарной производительности 5120 м³/сут

Показатель	Длина, м	Время, сут	Время, год	Скорость, м/сут
мин.	80,0463	10000	27,4	0,803
макс.	244,557	10000	27,4	2,446
среднее	162,92	10000	27,4	1,629

Результаты численного гидродинамического моделирования по второму варианту эксплуатационной нагрузки, представленные балансowymi характеристиками фильтрационного потока, показаны в таблице 14.

Анализ межпластовых перетеканий, по данным моделирования, позволяет сделать вывод о том, что при уменьшении производительности водозабора с поверхности во второй слой модели попадает расход в количестве 661,36 м³/сут близкий по геохимическому облику к поверхностным водам, формирующимся в значительной степени под влиянием болотных массивов.

Балансовые характеристики выделенного участка по трём верхним слоям модели при суммарной производительности водозабора 5120 м³/сут (в 3-ем слое работают скважины)

Направление притока	1-ый слой		2-ой слой		3-ий слой	
	приход	расход	приход	расход	приход	расход
справа	175,19	0	1604,86	0	204,46	0
спереди	0	-105,24	0	-1766,04	0	-224,39
снизу	1,37	-661,36	12,20	-4551,53	70,28	-1,52
слева	0	-75,92	0	-1016,30	0	-111,27
сверху	0	0	661,36	-1,37	4544,04	-12,20
сзади	665,96	0	5056,62	0	650,76	0

В этом случае, с учетом суммарного расхода водозабора интенсивностью 5120 м³/сут доля поверхностных вод на глубине установки фильтров эксплуатационных скважин возрастает до 12,92%, т.е. составляет почти 13%. Результаты моделирования показывают, что при изменении производительности водозабора доля поверхностных вод, поступающих на глубину, изменяется незначительно и может быть принята для проведения прогнозных физико-химических расчётов состава природных растворов на уровне 10 % от суммарного расхода эксплуатационных скважин.

На основе анализа техногенных изменений гидрогеологических условий с применением численного моделирования установлено:

Ведущим фактором формирования эксплуатационных запасов подземных вод является возможность их восполнения за счет емкостных запасов эксплуатационного водоносного комплекса палеогеновых отложений и привлекаемых ресурсов неоген-четвертичного водоносного комплекса, которые составляют подчиненную, но значительную часть в суммарном водоотборе эксплуатационных скважин. В свою очередь запасы подземных вод неоген-четвертичного водоносного комплекса пополняются избыточным (по сравнению с величиной испарения) количеством атмосферных осадков и обеспечены влиянием питающих границ (первого рода), представленных многочисленными (и обширными по площади) болотными массивами и другими поверхностными водоемами и водотоками.

Обширные болотные массивы способствуют формированию восстановительной геохимической обстановки водной среды, которая под влиянием разницы напоров за счет создания депрессии в эксплуатационном водоносном комплексе, способна оказывать влияние на изменение условий водной среды в нижних частях гидрогеологического разреза в зоне работы фильтров водозаборных скважин. Объемы перетекания, формирующиеся под влиянием работы группового водозабора непостоянны во времени в связи с выявленными тенденциями изменения водопотребления. Количественная оценка объемов перетекания и их изменения во времени поддается количественному учету с использованием численного моделирования. Полученные оценки изменения водного баланса в процессе эксплуатации, позволяют утверждать, что доля привлекаемых ресурсов подземных вод из верхней гидродинамической зоны неоген-четвертичного водоносного комплекса составляет значительную долю и изменяется в процентном отношении от 9 % до 13 %.

На региональной упрощенной численной модели района водозабора получена оценка пространственных размеров области возмущения под влиянием действующего водозабора. Численная модель показывает, что границы области влияния эксплуатационных скважин при максимальном водоотборе не превышают 50 км. Поэтому размеры локальной численной модели водозабора могут быть ограничены размером 25×25 км

Режим эксплуатации водозабора оказывает существенное влияние на состав подземных вод, подаваемых на вход технологической цепочки обработки воды перед подачей потребителю, и должен учитываться при выборе оптимального режима работы очистных сооружений (частота включения фильтров в режим промывки, частота замены фильтрующего материала).

Заметим, что в практике геологоразведочных работ на подземные воды проект очистных сооружений является неотъемлемой частью подсчета запасов подземных вод и разрабатывается по исходному химическому составу, полученному на стадии разведочных работ, т.е. как правило до начала работы водозабора. Результаты выполненного исследования показывают, что без физико-химического прогноза

эволюции гидрогеохимической обстановки эксплуатационного водоносного комплекса, опирающегося на результаты гидродинамического моделирования, невозможно полноценно учесть особенности изменения химического состава подземных вод в процессе перспективной работы водозабора.

Важно отметить, что результаты комплексного моделирования гидрогеологических условий позволяют на стадии разработки проекта водозабора внести дополнительные существенные уточнения в технологическую схему водоподготовки с целью повышения ее эффективности ее эксплуатационных характеристик.

5.2.2. Геохимические особенности Томского и Северского месторождений подземных вод

Томское и Северское месторождения подземных вод (рисунок 67) разведаны для водоснабжения южных наиболее обжитых и весьма проблематичных в экологическом отношении территорий Томской области. Здесь расположен областной центр город Томск и город Северск с его специфическим производством (СХК). Внимание к этим объектам всегда было и является по настоящее время, особо повышенным [7, 43, 56, 57, 79].

В геологическом отношении этот район находится в зоне сочленения Западно-Сибирской плиты с Алтае-Саянской складчатой областью. Сочленение имеет ступенчатый характер и осложнено серией разрывных нарушений в палеозойском фундаменте. Разрывные нарушения представлены достаточно густой сеткой дизъюнктивов, преимущественно северо-восточной и субширотной ориентировки. Это определяет особенности геологического строения района, в котором принимают участие интенсивно дислоцированные пликативной и нарушенные дизъюнктивной тектоникой метаморфизованные образования фундамента и перекрывающие их рыхлые песчано-глинистые отложения мезокайнозойского чехла. Породы фундамента, относящиеся к отложениям каменноугольной системы палеозоя, погружаются в северном и северо-западном направлении. Глубина залегания фундамента в районе водозабора достигает 250 м.

Так как тектоническое строение района исследований является весьма важным фактором во взаимоотношениях гидрогеологических подразделений.

Работы по геолого-геофизическому доизучению площади сочленения полигонов захоронения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и водозаборов гг. Северска и Томска, с целью уточнения геологической структуры района показали [27], что существующие на исследуемой территории разрывные тектонические нарушения (разломы), проявляющиеся в отложениях мела и палеогена, могут служить путями поступления глубинных растворов и газов в верхние водоносные горизонты.

Результаты водно-гелиевой съемки, проведенной в 2000 – 2001 гг. ФГУП ЗабНИИ г. Чита совместно с ОГУП ТЦ Томскгеомониторинг, на территории Обь-Томского междуречья и сопредельных территорий, включая территорию СХК, практически подтверждают выводы геолого-геофизического доизучения [87, 88]. Сущность водно-гелиевой съёмки заключалась в определении концентраций гелия в подземных водах для выявления ореолов его распространения, прослеживания разрывных тектонических структур, в т. ч. и тех, которые могут играть роль гидрогеологического окна, т. е. допускать переток подземных вод из одних горизонтов в другие. По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы. По результатам проведенных исследований были сделаны выводы о высокой степени площадной флюидопроводимости. Указывается, что на 15 % территории наблюдается восходящая циркуляция из глубоких горизонтов по зонам повышенной проницаемости. Их природа, скорее всего, тектоническая, поскольку имеющиеся гидрогеологические разрезы не дают оснований для предположения о литолого-фациальных окнах.

Такое достаточно сложное геологическое строение, предопределяющее взаимодействие разновозрастных гидрогеологических подразделений, взаимоотношение, взаимовлияние и сосуществование водозаборов, СХК и вызывает столь повышенный интерес и внимание к этому району, в целом.

В целом, работа водозаборов г.г. Томска и Северска характеризует типовые условия техногенных процессов, возникающих при добыче подземных вод

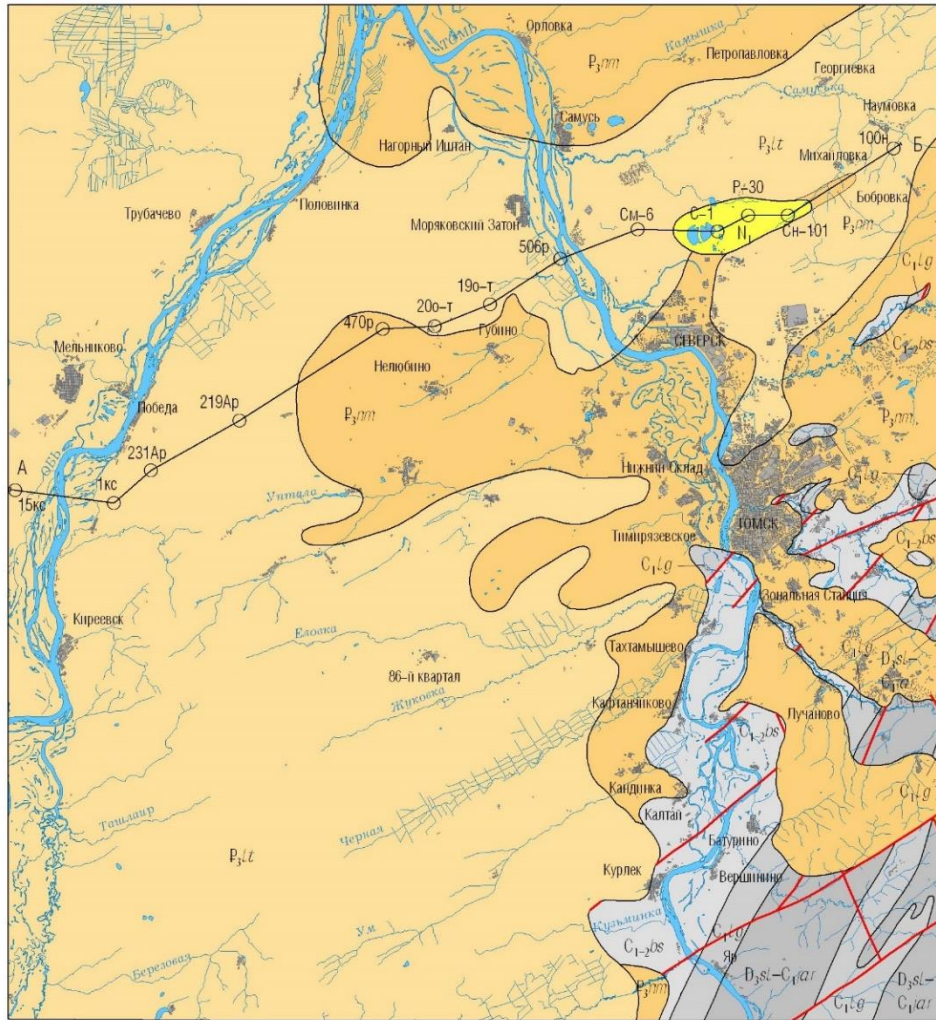
хозяйственно-питьевого назначения на многочисленных месторождениях подземных вод, расположенных в ландшафтных условиях южной тайги.



Рисунок – 67 Схема расположения водозаборов г.Томска и г. Северска: 1-линии эксплуатационных скважин водозабора города Томска; 2- водозаборы г. Северска.

5.2.2.1. Томское месторождение подземных вод

Томское месторождение подземных вод, одно из крупнейших в России было открыто в 1963 году, а с 1973 года оно обеспечивает водоснабжение областного центра. Территориально месторождение расположено в центральной и северной частях Обь-Томского междуречья. С юго-востока оно окаймлено структурами Колывань-Томской складчатой зоны, резко и уступообразно погружающимися в северном и западном направлениях, под образования мезозойско-кайнозойского чехла. В структурном плане Обь-Томское междуречье подобно желобу, наклоненному с юга на север с бортами, совпадающими с долинами рек Оби и Томи. Структурный план территории явился следствием тектонической деятельности не только колебательного, но и разрывного характера. Зоны максимальной тектонической активности были унаследованы долинами рек Оби, Томи и ее притоками. На Обь-Томском междуречье приток р. Томи имеют субдиагональное направление, совпадающее с одним из этапов тектоногенеза. В геологическом строении месторождения принимают участие породы от девонского до четвертичного возрастов (рисунок 68).



Составил В.Г. Бирюков по материалам работ В.Л. Карлсона (1975), В.Н. Сильвестрова (1997), Н.Ю. Ахмадзина (2002)

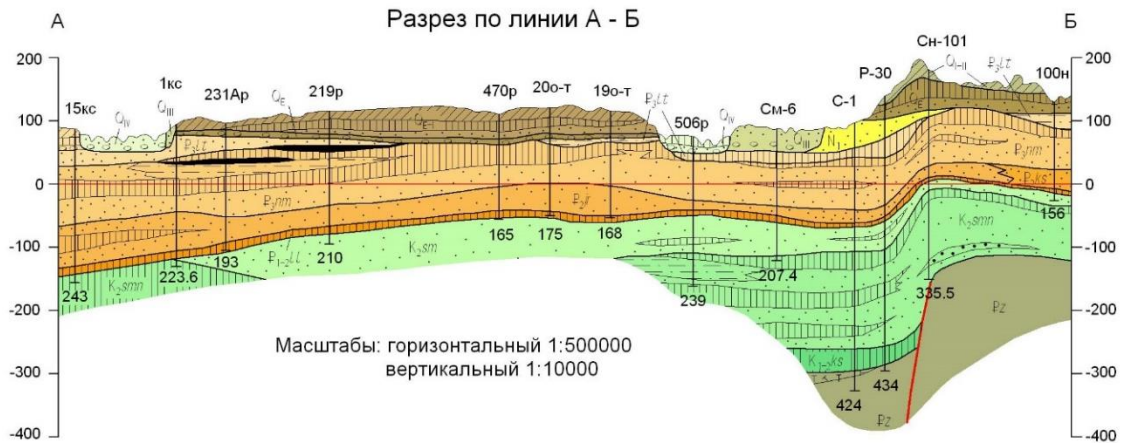


Рисунок – 68 Схематическая карта дочетвертичных образований (ООО «Томскгеомониторинг», 2005)

Условные обозначения к рисунку

Четвертичная система (только на разрезе)	Q_{IV}	Голоцен. Аллювий поймы. Пески, суглинки, галечники
	Q_{III}	Неоплейстоцен. Верхнее звено. Аллювий надпойменных террас. Пески, суглинки, глины, галечники
	Q_{I-II}	Неоплейстоцен. Нижнее-верхнее звенья. Озерно-аллювиальные отложения. Суглинки, пески
	Q_{E-I}	Эоплейстоцен-неоплейстоцен, нижнее звено. Озерно-аллювиальные отложения. Глины, суглинки, пески
	Q_E	Эоплейстоцен. Озерные и аллювиальные отложения. Глины, суглинки, пески, галечники
Палеогеновая система	$P_{3/t}$	Верхний олигоцен. Лагернотомская свита. Пески, глины, алевролиты, лигниты
	$P_{3/m}$	Нижний олигоцен. Новомихайловская свита. Глины, пески, бурые угли и лигниты
	$P_{2/y}$	Эоцен. Юрковская свита. Пески, прослойки глин, алевролитов, бурых углей
	$P_{2/s}$	Эоцен. Кусковская свита. Пески
	$P_{1-2/l}$	Палеоцен-эоцен. Люлинворская свита. Глины, пески
Меловая система	$K_{2/sm}$	Верхний отдел. Сымская свита. Пески с прослойками глин
	$K_{2/smn}$	Верхний отдел. Симоновская свита. Глины, пески, прослойки песчаников
	$K_{1-2/s}$	Нижний-верхний отделы. Кийская свита. Глины с линзами песков
Каменноугольная система	Pz	Палеозой нерасчлененный. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, сланцы
	$C_{1-2/bs}$	Нижний-средний отделы. Басандайская свита. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, сланцы
	$C_{1/g}$	Нижний отдел. Лагерносадская толща. Сланцы, алевролиты
	D_3sl-C_1ar	Верхний девон-нижний карбон. Саламатовская и ярская толщи нерасчлененные. Сланцы, алевролиты, песчаники

Литология пород

	Глина
	Суглинок
	Алеврит
	Песок
	Галечник
	Песчаник
	Бурый уголь, лигнит
	Кора выветривания

Прочие обозначения

	Стратиграфические границы
	Литологические границы
	Линия тектонического контакта
470р ○	Буровая скважина на карте и ее номер
470р 165	Буровая скважина на разрезе, вверху - ее номер, внизу - глубина, м
А — Б	Линия разреза

Томское месторождение подземных вод в структурно-гидрогеологическом отношении представляет собой многослойную систему артезианского типа с частичной изоляцией водоносных горизонтов и комплексов. В разрезе месторождения, преимущественно континентального осадконакопления, выделяются водоносные комплексы неоген – четвертичного, палеогенового и верхне-мелового возраста. Продуктивным и эксплуатируемым является комплекс подземных вод палеогеновых отложений. Глубина залегания кровли комплекса возрастает с юга на север от 40 до 80 м, а его мощность варьирует от 20 – 30 м в юго-восточной части месторождения, до 90 – 150 м – в северной. Породы продуктивного водоносного комплекса представлены горизонтами разнородных песков, в нижней части разреза обогащенных гравием и галькой. Разведанные эксплуатационные запасы подземных вод составляют около 500 тыс.м³/сут.

Томский водозабор из подземных источников в настоящее время содержит 177 скважин, которые подают потребителям до 125 тыс. м³ воды в сутки. Скважины расположены в трех линиях, их общая протяженность более 60 км (рисунок 69). Производительность скважин в среднем от 1,5 до 2,5 тыс. м³/сут.

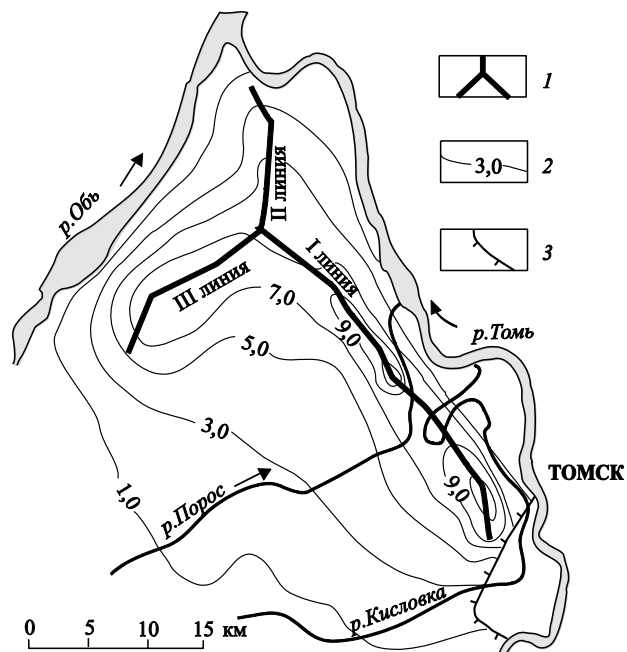


Рисунок – 69 Схема расположения водозабора г. Томска: 1 – линии эксплуатационных скважин водозабора; 2 – изолинии снижения уровня подземных вод, м; 3 – граница выступа палеозойского фундамента

Химический состав и качество подземных вод изучались в течение всего периода освоения месторождения: при разведке, режимных наблюдениях, выполнении регламентных эксплуатационных работ, контроле качества воды, подаваемой населению, разнообразных тематических работах [7, 28 - 30, 35, 50 - 53, 71, 72, 75, 80].

В таблице 15 приведены некоторые результаты проведенных ТПУ тематических гидрогеохимических исследований (ссылка). Исследования заключались в относительно единовременном опробовании множества эксплуатационных (72) и ряда режимных скважин. Изучался широкий спектр макро и микрокомпонентов, газовый, микробиологический состав, общая органика и органические микропримеси.

Согласно этим данным и множеству других исследований в условиях Томского месторождения формируются типичные для ландшафтных условий южной тайги пресные, преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, нейтральные или слабощелочные, умеренно жесткие воды, с повышенными содержаниями железа, марганца, иногда органических веществ.

Для вертикального разреза характерна, преимущественно, нормальная гидрогеохимическая зональность. С глубиной, по мере изменения гидродинамических условий, от верхних неоген-четвертичных к палеогеновым и меловым горизонтам, наблюдается рост макрокомпонентов и общей минерализации, меняется химический тип воды с гидрокарбонатно - кальциевого на гидрокарбонатно – натриевый, уменьшается количество кислорода и органических веществ.

Показателями, ухудшающими качество эксплуатируемых вод, являются железо, марганец, реже органические вещества, соединения азота, общая жесткость. Железо превышает допустимые нормы практически в ста процентах случаев. В большинстве случаев повышенные значения этих показателей обусловлены естественно природными факторами.

Таблица 15

Химический состав подземных вод района Томского водозабора
(Шварцев, 1998; Зуев и др.)

Компоненты	Единицы измерения	Водоносные горизонты отложений								
		Неоген-четвертичных			Палеогеновых			Верхнемеловых		
		Мин	Макс	Среднее	Мин	Макс	Среднее	Мин	Макс	Среднее
pH	-	6,8	8,5	7,77	6,2	8	7,26	7,24	8,4	8
HCO ₃ ⁻	мг/л	85,4	451	281	159	451	345	220	781	356
Cl ⁻	мг/л	0,51	16,7	4,09	0,72	17,7	6,42	0,7	396,4	60,6
SO ₄ ²⁻	мг/л	0	14	0,41	0	4	0,32	0	0	-
NO ₃ ⁻	мг/л	0	4,56	0,02	0	0,14	0,03	-	-	-
NO ₂ ⁻	мг/л	0	0,1	0,018	0	0,05	0,004	0	0,034	0,008
Ca ²⁺	мг/л	4,1	104	56,9	12	110	75,8	14	64	38,6
Mg ²⁺	мг/л	1,22	47,4	15	6,03	24	14,5	7,3	21,9	15,1
Na ⁺	мг/л	0,53	112	12,8	6,44	80	14,3	12,4	202,7	68,4
K ⁺	мг/л	0,44	3,51	1,22	0,75	3,46	1,26	0,1	5,2	1,5
NH ₄ ⁺	мг/л	0	2,68	0,69	0	2,2	0,62	0,1	1	0,7
SiO ₂	мг/л	1,78	4,7	3,34	3,23	10,2	7,55	-	-	-
Сумма	мг/л	93,9	762	375	188	702	466	254	1472,2	540,9
CO ₂ св	мг/л	8,8	132	42,1	8,85	66	19,9	10	35,2	20,1
Fe _{общ}	мг/л	0,01	0,09	0,03	0,63	10	1,71	1,5	9,1	3,3
O ₂	мг/л	0	2,1	0,71	0,1	3,52	0,36	-	-	-
Zn	мкг/л	8,6	45	21,4	4,09	154	20,8	-	-	32
Mn	мкг/л	13,3	40,1	20,5	1,63	134	8,92	-	-	-
Pb	мкг/л	1,03	6,04	2,92	0,21	19	1,16	-	-	9
Cu	мкг/л	0,61	5,02	2,48	0,1	7,15	1,09	-	-	4,2
Cr	мкг/л	2,66	9,37	5,59	0,17	11,2	4,61	-	-	-
Li	мкг/л	0,5	22	7,14	4,88	22	7,62	-	-	30
Число анализов		38			72			8		

В целом же, подчеркивается длительно, различными службами, качество вод достаточно высокое, а при соответствующей водоподготовке отвечает санитарным требованиям для централизованного питьевого водоснабжения.

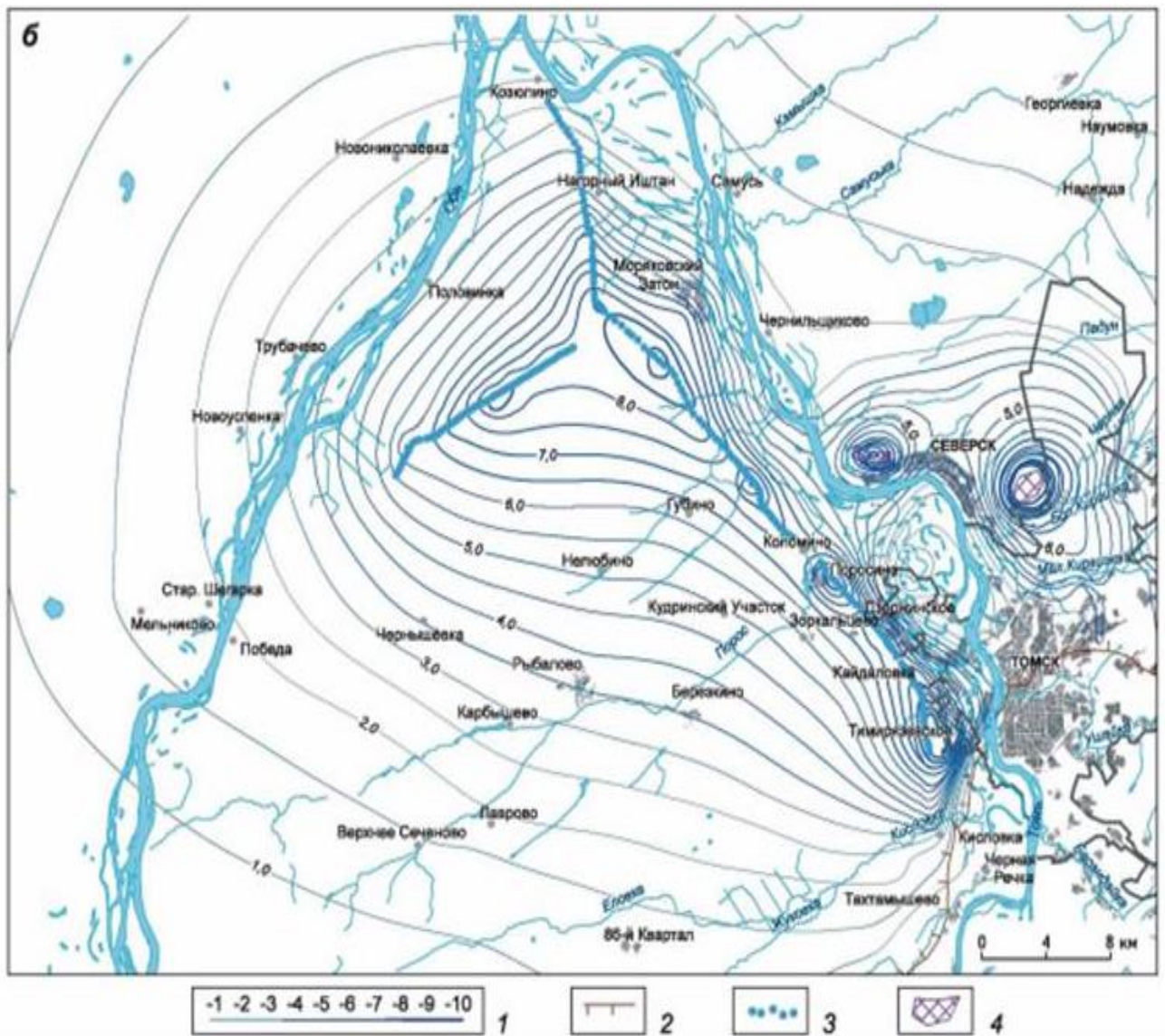
Вместе с тем, месторождение эксплуатируется уже почти 50 лет. Работа столь грандиозного объекта привела к формированию депрессионных воронок, как в эксплуатируемом палеогеновом водоносном комплексе, так и в водоносных горизонтах, залегающих выше. Естественно предположить, что столь масштабные изменения

гидродинамических условий не могут не приводить и к изменениям качества извлекаемых вод. Потенциальные изменения гидрогеохимических условий постоянно привлекали внимание к объекту.

Большой интерес проявлен к вопросам эколого-геохимической оценки состояния и качества подземных вод Томского водозабора (В.А. Зуев и др. 1994; 1999; Н.А. Ермашова и др. 1995; О.В. Колоколова, 2003). Неоднократно рассматривалась проблема эффективности гидрогеологических исследований не только на основе оптимизации режимных наблюдений (А.М. Альшанский и др., 1995; Ю.В. Макушин, 1998), но и с применением дополнительных методов исследований (А.В. Флешер, 2007; Е.В. Черняев, О.В. Колмакова, 2007).

Кроме того, отмечены изменения, касающиеся миграционной способности переменного валентных элементов. Этот факт отмечен на раннем этапе эксплуатации месторождения (П.А. Удодов, С.Л. Шварцев). Аэрация недр, происходящая в зоне формирующихся депрессионных воронок и перетоки аэрированных вод из вышележащих горизонтов в эксплуатируемый, приводят к уменьшению миграционной способности переменного валентных элементов.

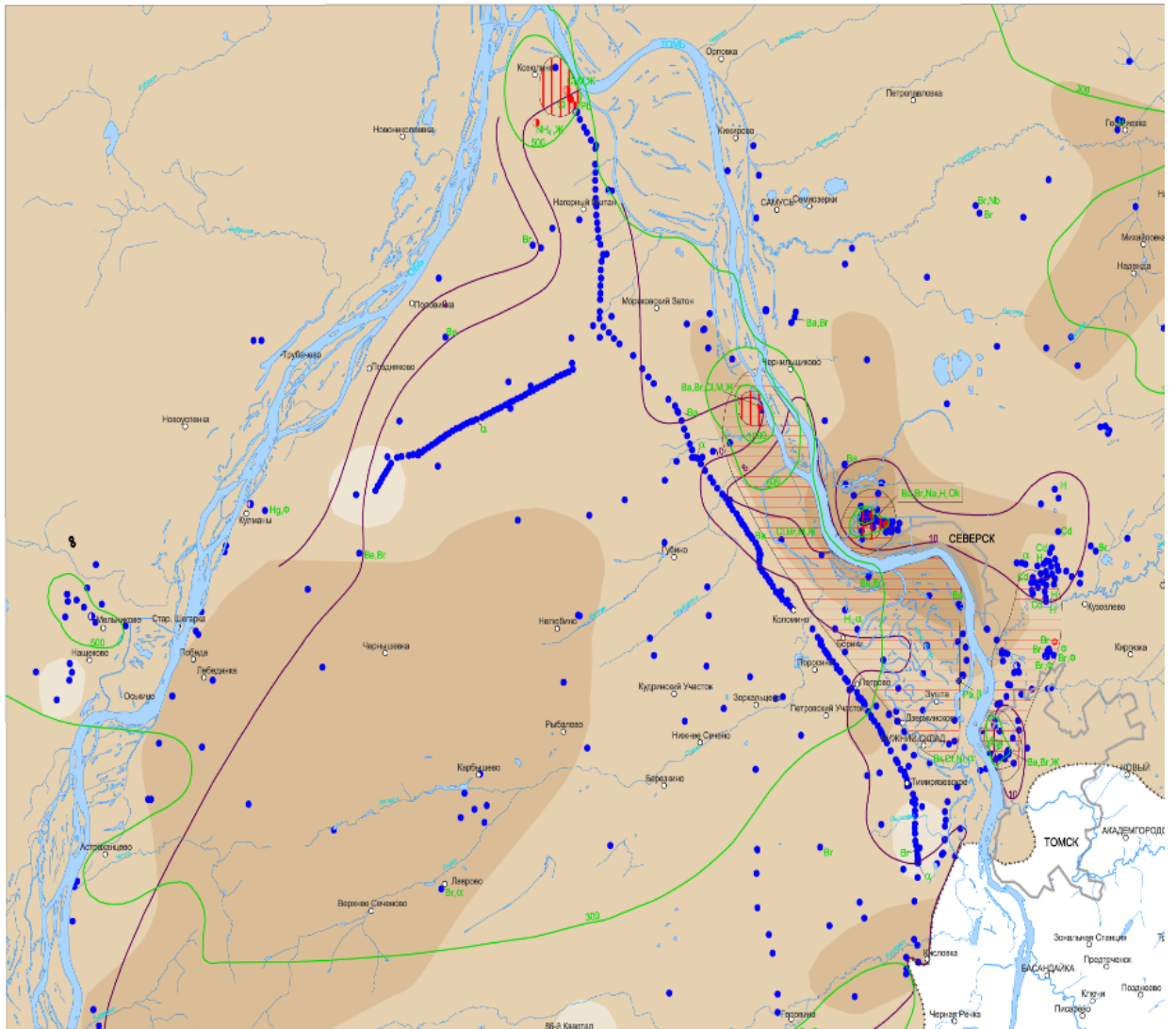
Приведенные данные наблюдений и картографических построений ООО «Томскгеомониторинг» показали, что для вод большинства скважин, расположенных в центре депрессионных воронок наблюдаются пониженные концентрации железа общего. В водах же некоторых скважин, вероятно, находящихся в сфере локального проявления глеевых условий в поведении железа наблюдается обратная картина (рисунок 70, 71).



Условные обозначения

- 1 – снижение урона подземных вод, м;
- 2 – граница выклинивания палеогеновых отложений;
- 3 – эксплуатационные скважины Томского водозабора;
- 4 – контуры ваодозаборов г. Северска.

Рисунок – 70 Изменение среднегодовых значений снижения уровней подземных вод палеогенового водоносного комплекса в пределах Обь-Томского междуречья за период работы водозабора (ООО «Томскгеомониторинг»).



Условные обозначения

I. Скважина гидрогеологическая

Ва, Вг, Ф Индексы - названия химических элементов
 Содержание элементов в подземных водах:
 зеленый цвет - 1-5 ПДК
 красный цвет - > 5 ПДК

Ва бериллий	Рб свинец	Na натрий
Сд кадмий	Ni никель	Cl хлориды
Ва барий	Н нефтепродукты	М минерализация
Вг бром	Ок окисляемость	α альфа активность
Cr хром	Н ₄ азот аммонийный	Ф фенольный индекс
Нг ртуть	Ж жесткость	

II. Анионный состав вод

- гидрокарбонатный
- ⊕ хлоридно-гидрокарбонатный
- хлоридный
- ⊕ гидрокарбонатно-хлоридный
- не определен

III. Содержание железа общего, мг/л

	менее 1
	1-3
	3-6
	более 6

IV. Участки с повышенным содержанием химических элементов (> фона, но < ПДК)

- ▨ хлориды
- ▨ сульфаты

V. Участки превышения ПДК

- ▨ хлориды

VI. Прочие обозначения

- 200 изоплинии минерализации, мг/л
- 10 изоплинии содержания кремния, мг/л
- граница выклинивания палеогеновых отложений

Рисунок – 71 Пространственное распределение железа общего в подземных водах палеогеновых отложений Обь-Томского междуречья (ООО «Томскгеомониторинг»).

Весьма интересный факт в отношении изменения микробиологического состава при эксплуатации подземных вод отметил В.А. Зуев. Так называемую стерильность эксплуатируемых вод в отношении многих гетеротрофных организмов в районе максимального развития депрессионной воронки, не характерную для природной среды он, предположительно, объяснил гидродинамическим фактором, резко нарушающим поведение микроорганизмов.

За время эксплуатации месторождения особое внимание уделялось роли отложений верхнего мела в формировании запасов подземных вод (В.А. Зуев, Т.Г. Кривенцова, 1996; Н.А. Ермашова и др. 1996).

На начальном этапе фильтрационные потоки всех горизонтов в южной, юго-восточной и центральной частях междуречья были направлены к естественным дренам - рекам Оби и Томи, т.е. на север, восток и запад. Причём этот структурный план сохранялся и для более глубоких горизонтов нижнего мела, где пьезометрические поверхности также снижаются к долине реки Оби (Гидрогеология СССР, т. XVI).

Так, по данным В.Д. Мокренко и В.Я. Герасимова (1974) до пуска водозабора в эксплуатацию уровни пьезометрической поверхности нижнего горизонта отложений симоновской свиты на водоразделах превышали уровни эксплуатационного водоносного горизонта на 11,4 м. Следовательно, в естественных условиях существовали предпосылки для перетока вод из образований верхнего мела в палеогеновый, однако их реализация сдерживалась водоупорами люлинворской свиты и кровли сымской свиты.

Поэтому в нарушенных условиях при уменьшении мощности разделяющих водоупоров или нарушении их сплошности воды нижележащих горизонтов могут разгружаться в вышележащие, оказывая влияние на их состав.

Гидродинамические условия междуречья показывают, что все горизонты получают основное питание на юге междуречья, в широкой заболоченной долине р. Б. Черная, откуда движутся по направлению на север, а в центральной части междуречья могут отжиматься в вышележащие горизонты и к бортам речных

долин, где и получают возможность разгружаться в тектонически ослабленные зоны или литологические окна.

Под влиянием гидродинамических полей формируются и гидрогеохимические условия. В образованиях четвертично-верхнеэоценового возраста в силу их высоких фильтрационных свойств и интенсивного водообмена повсеместно развиты гидрокарбонатные кальциевые, кальциево-магниевые и кальциево-натриевые воды с минерализацией 0,2 - 0,4 г/дм³. В вертикальном разрезе наблюдается постепенное уменьшение солености от верхнего горизонта к нижнему от 0,41 до 0,26 г/дм³, т.е. от зоны до отложений олигоцена и юрковской толщи. Вблизи основных дрен - рек Оби и Томи - песчаные образования продуктивного горизонта, особенно его нижней части (юрковской толщи) хорошо промыты и заключенные в них воды обладают минимальной и весьма устойчивой минерализацией, что обеспечено возрастанием выноса минеральных компонентов (Бычков, Ермашова и др., 1970).

В соответствии с распределением гидродинамических полей формируются и гидрогеохимические условия. В образованиях четвертично-верхнеэоценового возраста в силу их высоких фильтрационных свойств и интенсивного водообмена повсеместно развиты гидрокарбонатные кальциевые, кальциево-магниевые и кальциево-натриевые воды с минерализацией 0,2 - 0,4 г/дм³. В вертикальном разрезе наблюдается постепенное уменьшение солености от верхнего горизонта к нижнему от 0,41 до 0,26 г/дм³, т.е. от зоны аэрации к кочковской свите, затем к образованиям верхнего и среднего олигоцена и к юрковской толще. Вблизи долин рек Оби и Томи песчаные образования продуктивного горизонта, особенно его нижней части хорошо промыты, а заключенные в них воды обладают минимальной и весьма устойчивой минерализацией, что обеспечено возрастанием выноса минеральных компонентов (Бычков, Ермашова и др., 1970).

Пуск второй линии Томского водозабора изменил гидродинамическую и гидрогеохимическую ситуации в продуктивном горизонте, особенно в приустьевой части долины р. Томи. Сформировалась обширная депрессионная воронка, изменяющая свою конфигурацию в зависимости от режима работы водозабора. Ее

переформирование началось с пуском третьей линии в 1989 г. В западном направлении она продвинулась на 16 - 18 км, а в северо-западном достигла р. Оби. На север и восток она уходит под р. Томь со срезкой уровня 2 – 6 м вдоль русла. Сработка уровней в продуктивном горизонте изменила их соотношение в сторону превышения пьезометрической поверхности вод отложений верхнего мела над водами эксплуатируемого горизонта на широкой площади, что вызвало изменение гидрогеохимических условий в этом горизонте. Довольно на северном фланге второй линии (район скв. 127-э) минерализация эксплуатируемых вод возросла до $1,2 \text{ г/дм}^3$, а состав преобразовался в хлоридный натриевый. Концентрация хлоридов вблизи эксплуатационной скважины достигла $567,25 \text{ мг/дм}^3$, в то время как в скв. 122-э она не превышала 21 мг/дм^3 . На удалении от водозабора в направлении к р. Томи содержание хлоридов 5 раз превысило фон. Синхронно повышаются содержания натрия, что указывает генетическую взаимосвязь этих компонентов. Однако, несмотря на то, что с 2011 г добыча из эксплуатационных скважин в конце второй очереди водозабора была остановлена, существенного уменьшения минерализации и хлоридов не произошло (рисунок 72, 73).

Наиболее контрастная аномалия минерализации выявлена при проведении гидрогеологической съемки в 1963 г. Ю.К. Смоленцевым в долине р. Оби вблизи впадения в нее р. Томи. Скважинами вскрыт разрез сымской и симоновской свит верхнего мела. Здесь на фоне гидрокарбонатных преимущественно кальциево-натриевых вод с минерализацией $0,3 - 0,5 \text{ г/дм}^3$ в отложениях нижней части симоновской свиты на глубине 444 – 450 м установлена обширная зона хлоридных натриевых вод, соленость которых достигла $8,16 \text{ г/дм}^3$. Механизм ее возникновения может быть связан с внедрением более высоконапорных и минерализованных глубинных вод в пресный поток.

Таким образом, для вод образований верхнего мела Обь-Томского междуречья гидрогеохимические закономерности выражаются в развитии вдоль зоны выклинивания и в верхней части разреза (сымская свита) центральной части междуречья гидрокарбонатных вод со смешанным катионным составом и минерализацией $0,2 - 0,37 \text{ г/дм}^3$. В них в долинах рек Оби, Томи и в Моряковской

ложбине стока внедряется поток соленых хлоридных натриевых вод, образующих аномалии не только в отложениях верхнего мела, но и в водоносном горизонте палеогена, эксплуатируемом Томским водозабором.

Очевидно, что аномалии в продуктивном горизонте контролируются режимом водоотбора на второй и третьей линиях водозабора. По мере их расширения возрастает объем некондиционных вод, подаваемых на станцию водоподготовки, что снизит эффективность ее работы. При этом постоянно будет ухудшаться качество воды, подаваемой в город, отклоняясь от естественного, как минимум, по солености и хлоридам натрия.

В последнее время, по данным длительных режимных наблюдений выделяется несколько похожих аномалий на участках расположения скважин №№: 507р, 125э-127э, 458р, 444р, 151э-157э. Их наличие объясняется современной флюидоактивной тектоникой и с активизацией вертикальных перетоков через литологические окна из нижнего мелового комплекса под влиянием эксплуатации Томского месторождения.

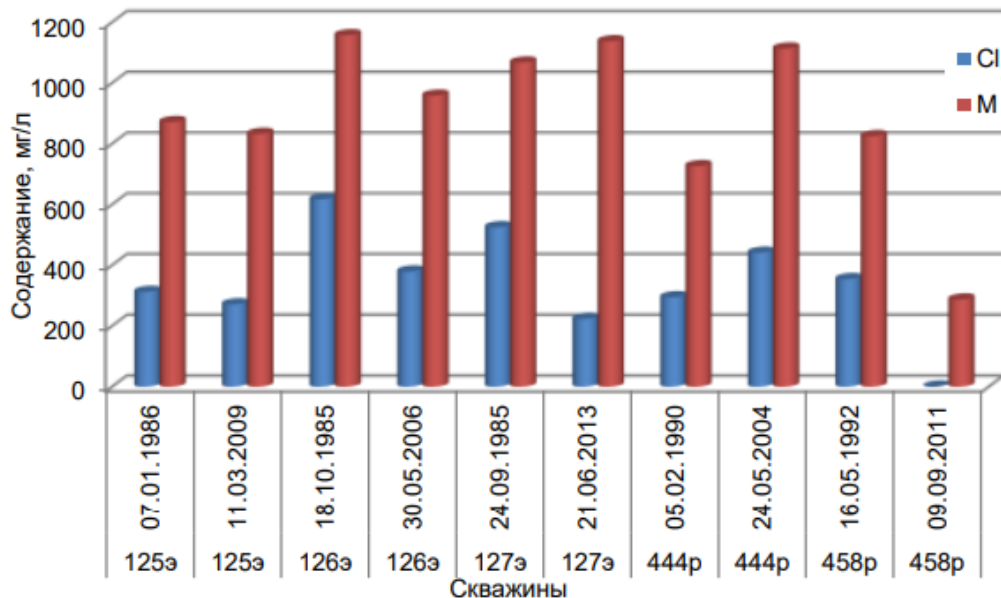


Рисунок – 72 Изменения минерализации и содержаний хлоридов в подземных водах в районе конца 2-й очереди Томского водозабора [1]

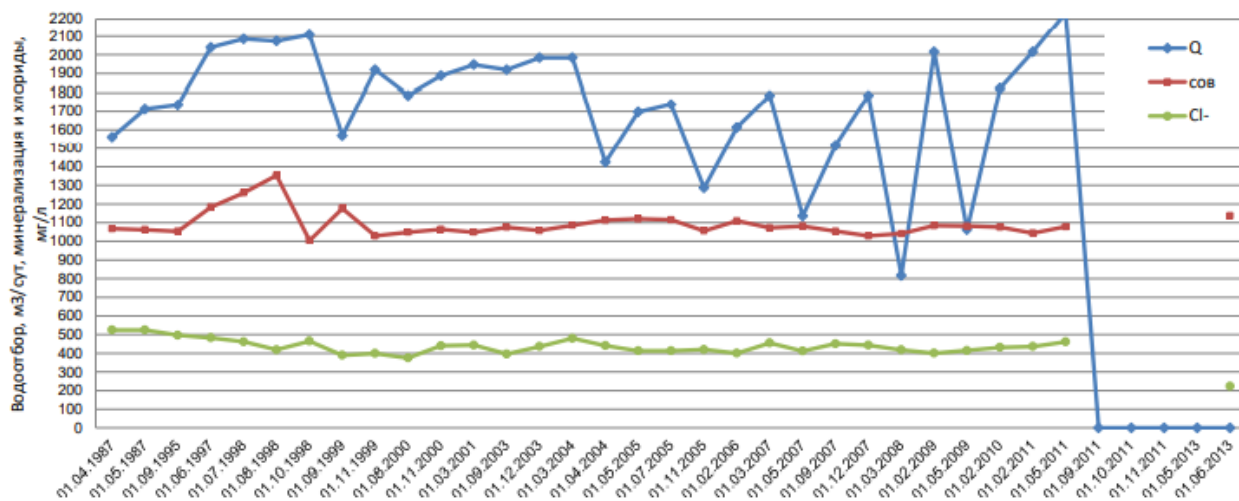


Рисунок – 73 Зависимость минерализации и содержаний хлоридов в скв. 127э от величины водоотбора [1]

В центральной части третьей очереди на участке скважин 151э-157э, под влиянием вертикальных перетоков, в течение ряда лет отмечались скачкообразные содержания хлоридов и повышение минерализации (рисунок 74).

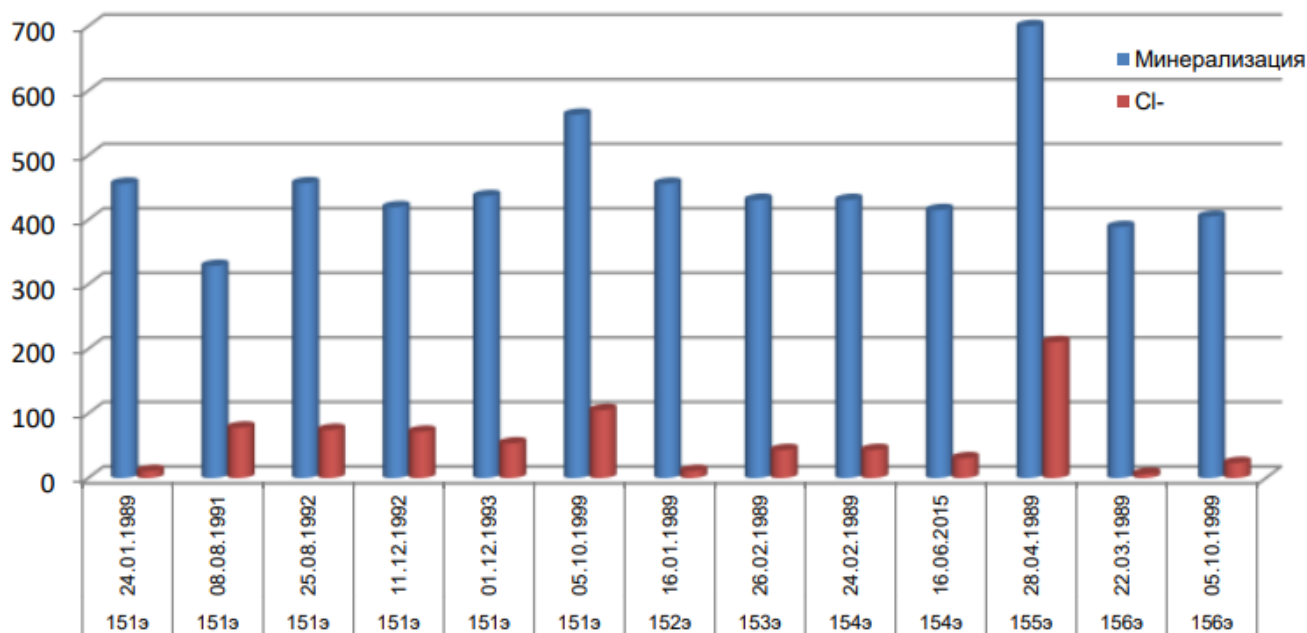


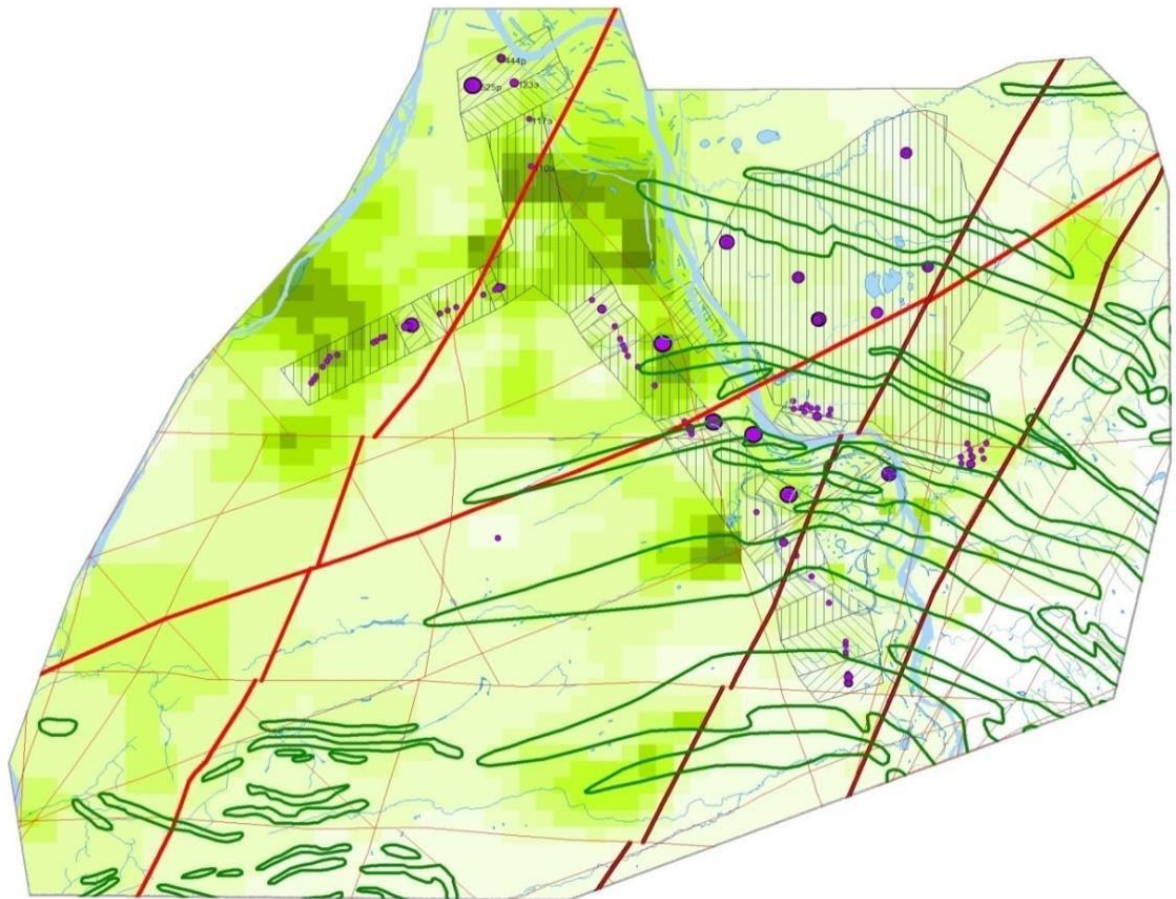
Рисунок – 74 Изменения минерализации и содержаний хлоридов в подземных водах в районе 3-й очереди Томского водозабора [1]

По результатам проведенных водно-гелиевых исследований на территории полигона «Томский» в границах Обь-Томского междуречья установлено наличие аномалий, которые могут быть связаны с современной флюидактивной

тектоникой или с перетоком по литологическим окнам в водоупоре, что является дополнительным подтверждением ранее выдвинутых предположений о локальных нарушениях сплошности водоупорных экранов (рисунок 75).

В зонах гидрогеохимических аномалий Обь-Томского междуречья воздействие подтока из нижележащих меловых водоносных горизонтов хлоридно-натриевых вод с повышенной минерализацией отмечено относительно высокими концентрациями гелия и приурочено к зонам повышенной флюидопроницаемости. В результате изучения изотопного состава подземных вод в зоне гидрогеохимической аномалии в районе д. Тигильдеево выявлено, что воды палеогеновых и верхнемеловых отложений имеют одинаковый изотопный состав, одинакова интенсивность их инфильтрационного питания. Воды палеогеновых отложений можно отнести к седиментогенным, меловых – к инфильтрационным. Отличия химического состава палеогеновых и меловых вод в этой зоне можно объяснить тем, что формирование этих вод происходило в широком промежутке времени (сотни-тысячи, первые десятки тысяч лет) [73].

Различие состава вод меловых отложений сымской, симоновской и кийской свит в районе Томской аномалии определяется сложностью геологических условий осадконакопления на стыке артезианского бассейна с Колывань-Томской складчатой зоной: выклинивание осадочных отложений, осложненных тектоническими нарушениями, близость областей питания подземных вод и разгрузки подземных вод мезозойской водообменной системы, характером водообмена (степенью промытости отложений). Навстречу региональному потоку древних инфильтрационных и современных инфильтрационных вод из внешнего пояса плиты, из внутренних областей бассейна под воздействием геостатических и геодинамических напряжений к его периферии идет встречный поток ПВ и по фронту встречи этих потоков происходит разгрузка глубинных вод в верхнюю водообменную систему бассейна, усиливающаяся интенсивным дренирующим влиянием крупных водных артерий.



Условные обозначения



Рисунок – 75 Схема флюидопроводимости и особенности геолого-тектонического строения на территории полигона «Томский» [87]

Наиболее пресные воды (минерализация 160-350 мг/л) наблюдаются вблизи границ выклинивания меловых отложений в юго-восточной части Обь-Томского междуречья и на правом берегу р. Томи. При погружении водоносных отложений мела минерализация вод сымских отложений верхнего мела увеличивается от

границ выклинивания на северо-запад междуречья до 0,81 г/л, а на левобережье р. Оби она достигает 4,1 г/л. В водах симоновской свиты на небольшом расстоянии наблюдаются значительные колебания солености и состава вод. Минерализация вод свиты скачкообразно повышается к долине р. Томи – до 1,98 г/л. В северной части междуречья минерализация подземных вод отложений кийской свиты достигает 4,1 г/л.

В естественных условиях мозаичность химического состава является результатом внедрения глубинных хлоридно-натриевых вод морского генезиса в воды континентальных осадков. При эксплуатации подземных вод могут формироваться условия благоприятные для усиления явлений перетекания, что требует прогноза эволюции химического состава подземных вод при длительном водоотборе для целей централизованного водоснабжения. Такая работа выполнена сотрудниками ООО «Томскгеомониторинг» при выполнении работ по переоценке запасов подземных вод на Томском водозаборе в 2005 г. с применением численного моделирования. Для подсчёта запасов подземных вод сотрудниками компании и специалистами ГИДЭК использованы возможности программного комплекса Groundwater Modeling System. Выбор этого пакета прикладных программ предопределён его универсальными возможностями в области калибровки модельных решений; наличием удобного и гибкого инструментария для обмена информацией с внешними ГИС и другими форматами исходных данных; практическим отсутствием ограничений на число расчетных блоков в сочетании обширным набором внешних и внутренних граничных условий.

С учётом необходимости включения в границы моделируемой области фильтрации кроме скважин Томского водозабора сопутствующих объектов (таких как, например, водозаборы г. Северска, расположенные на правом берегу р. Томи и одиночные скважины), размер расчётной ячейки конечно-разностной сетки принят равным 1×1 км. Размер моделируемой области фильтрации охватывает расстояние 120 км в направлении с запада на восток и 110 км. Численная геофильтрационная модель включает пять водоносных и четыре водоупорных. Верхний слой модели имеет напорно-безнапорный гидравлический характер, а

остальные слои являются напорными. Водонепроницаемая подошва численной модели совпадает с расположением в разрезе глинистых отложений кийской свиты и коры выветривания палеозоя.

Внешние границы области фильтрации совпадают с очертаниями основных водоразделов, а в некоторых случаях с линиями тока естественного фильтрационного потока. Эти контуры заданы на модели как границы II-го рода (непроницаемые). Долины крупных рек заданы в первом слое модели как границы I-го (питающие), а более мелкие водотоки реализованы как граничные условия III-го рода (полупроницаемые). Водозаборные скважины заданы на модели как внутренние граничные условия II-го рода (с переменным во времени расходом), нагнетательные скважины полигонов закачки ЖРО на территории СХК.

Величина инфильтрационного питания задана пропорционально количественной оценке подземного стока, рассчитанного по данным ТЦГМС или принята равной 15% от среднегодовой суммы атмосферных осадков для слабо изученных участков, что соответствует 0,0002 м/сут. В процессе многократного повторения численных экспериментов этот показатель наравне с начальным распределением коэффициентов фильтрации в каждом расчетном блоке неоднократно уточнялся в соответствии с задачами калибрации модели.

В результате решения эпигнозной задачи получено удовлетворительное совпадение модельных гидроизопьез с фактическим положением уровней и понижений подземных вод палеогенового водоносного комплекса по состоянию на 2004 г. Это послужило основой решения прогнозной задачи, использованной для подсчёта запасов подземных вод. Однако, зафиксированные повышенные значения минерализации в интервале залегания горизонте юрковской свиты привели к необходимости оценки изменения минерализации подземных вод в процессе эксплуатации в северной части Томского водозабора.

Для этой цели на базе гидродинамической модели создана дополнительная профильная модель-врезка для решения миграционной задачи относительно прогноза изменения показателя минерализации подземных вод. В качестве граничных (на боковых гранях крайних расчётных блоков модели) и начальных (во

всех других расчётных блоках) условий были заданы значения минерализации, фиксируемые в подземных водах на данной территории (таблица 16).

Таблица 16

Заданные на профильной модели значения минерализации подземных вод

№№ слоя	Горизонт	Минерализация, мг/л	
1	P ₃ -Q	600	
2	P ₃ lt-nm	700	
3	P ₃ nm		
4	P ₃ nm-P ₂ jr	1250	
5	P ₂ jr		
6	P ₁₋₂ ll	1500	
7	K ₂ sm		
8	K ₂ smn	<u>1 вариант:</u>	<u>2 вариант:</u>
9	K ₂ smn	4000	2000

В силу слабой гидрогеохимической изученности подземных вод отложений симоновской свиты начальные условия для решения прогнозной задачи принимались по двум вариантам. В первом случае минерализация подземных вод симоновской свиты достигала максимально высокого значения 4 г/л, а во втором только 2 г/л.

Первый вариант решения предполагает вовлечение в эксплуатацию подземных вод с максимально возможной минерализацией. Второй вариант учитывает наличие гидравлической связи между эксплуатируемым юрковским и нижележащими горизонтами по зоне возможного тектонического нарушения. В этом случае принимается во внимание тот факт, что минерализация эксплуатируемых подземных вод здесь в начальный период работы водозабора составляла 1,2 г/л.

При решении геомиграционной задачи на юго-западной границе профиля по всем слоям задана граница 1 рода по минерализации. В русле р. Томи она составила 100 мг/л, а величина минерализации атмосферных осадков осреднена до 500 мг/л при активной пористости 0,2.

На миграционной модели по каждому варианту выполнено решение эпигнозных (стационарной и нестационарной) и прогнозной задачи. На этапе

решения эпигнозных задач использовались данные о минерализации подземных вод юрковских отложений в скважине 127э, которая в естественных условиях достигала 1,5 г/л. При калибровке модели возможность формирования процессов перетекания учитывалась увеличением коэффициентов фильтрации разделяющих слоев № 6 (между юрковским и сымским горизонтом) и № 8 (между сымской и симоновской толщей). Такой приём позволяет учесть наличие предполагаемого тектонического нарушения, а на модели реализуются наиболее неблагоприятные условия с позиций ухудшения качества подземных вод при наличии перетекания.

В первом варианте моделировалась зона тектонического нарушения шириной один километр при двукратном увеличении коэффициента фильтрации отдельной толщи между юрковским и сымским горизонтами (слой № 6), а также между водовмещающими отложениями сымской и симоновской свит (слой № 8) до 0,0002 м/сут. В этом случае модельное значение минерализации подземных вод юрковской толщи составило 1368 мг/л.

По второму варианту модели (при меньшей минерализации подземных вод сымских отложений) ширина тектонического нарушения была уменьшена до 300 м, а коэффициенты фильтрации изолирующих слоёв (№№ 6 и 8) увеличены в 10 раз до 0,001 м/сут. При этом расчётное значение минерализации достигло 1532 мг/л.

Результаты моделирования показывают, что основная разгрузка подземных вод с повышенной минерализацией, осуществляется поверхностные воды р. Томи, а в эксплуатационной скважине происходит разбавление разгружающегося вверх потока вод повышенной минерализации привлекаемыми к скважине водами вышележащих горизонтов с меньшей минерализацией.

5.2.2.2. Северское месторождение подземных вод

Хозяйственно-питьевое водоснабжение г. Северска, осуществляется двумя водозаборами из подземных источников. Водозаборы эксплуатируют горизонты юго-западной окраины Западно-Сибирского мегабассейна.

Территориально водозаборы г. Северска расположены на правом берегу р. Томи (рисунок 76). Водозабор № 1, эксплуатирующийся с 1962 года состоит из

32-х скважин, оборудованных на палеогеновый водоносный горизонт. Водозабор № 2, работающий с 1971 года состоит из 22-х скважин и совместно эксплуатирует воды палеогенового и верхнемелового водоносных горизонтов. Дебиты отдельных скважин изменяются от 40 до 120 м³/сут. Суммарная производительность водозаборов достигает 50 тыс. м³/сут.

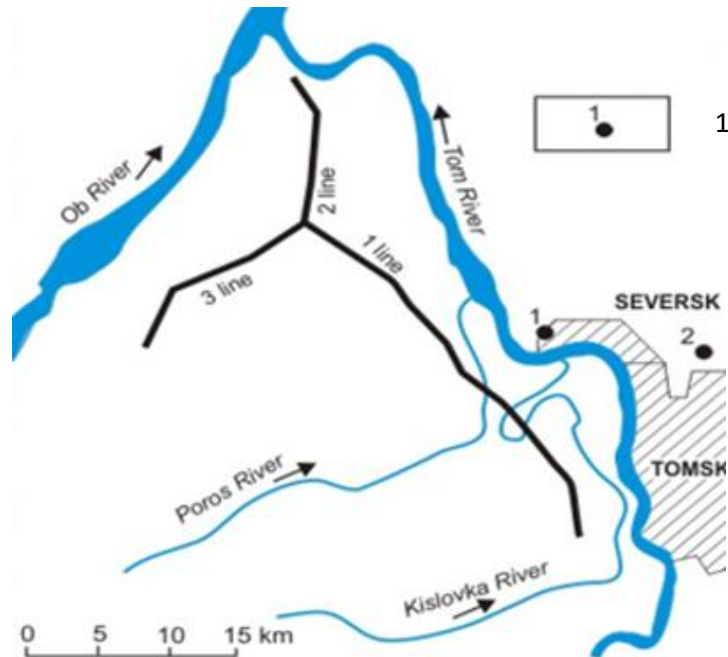


Рисунок – 76 Схема расположения водозаборов г. Северск:

1 – водозабор и его номер

Водозабор № 1 расположен на интенсивно освоенной в хозяйственном отношении территории, в окружении промышленных, аграрных предприятий и жилой застройки, включая г. Северск. Потенциальные источники загрязнения подземных вод, расположены в непосредственной близости, практически по контуру водозабора. Это золоотвалы ТЭЦ на западе, завод крупнопанельных строительных материалов, ТЭЦ и его мазутохозяйство, сублиматный и ремонтно-механический заводы СХК на севере, пассажирско-грузовое автохозяйство г. Северск на востоке, садово-огородные участки п. Иглаково, мелкие частные предприятия на территории бывшего теплично-парникового хозяйства на юге. Существующая ситуация позволяет говорить о неблагоприятной санитарно-эпидемиологической обстановке в данном районе [2, 92].

Санитарная обстановка в пределах ЗСО водозабора № 2 существенно отличается от таковой на водозаборе № 1. В непосредственной близости

отсутствуют крупные производственные объекты. Территория I-го пояса ЗСО в нормативных границах и входящая в неё площадь II-го пояса ЗСО, оцененная проектными расчетами, не выходят за пределы земельного участка водозабора и не накладываются на санитарно-защитные зоны других объектов. В границах III-го пояса ЗСО расположены склад ГСМ СХК, садово-огородные участки, часть объектов Томского нефтехимического комбината, окраина городского кладбища, полигон промышленных отходов и канализационные очистные сооружения г. Томск. Сравнительная оценка санитарно-эпидемиологической обстановки на территории ЗСО водозаборов говорит о более благоприятных условиях в районе водозабора № 2.

По химическому составу воды эксплуатационных скважин водозаборов гидрокарбонатные с различными взаимоотношениями кальция и магния, пресные, нейтральные и слабощелочные, умеренно-жесткие (таблица 17).

В целом подземные воды являются типичными представителями вод таежных и подтаежных ландшафтов железо-марганцевой Западно-Сибирской геохимической провинции. Значения, превышающие предельно допустимые для вод хозяйственно-питьевого назначения, имеют здесь содержания железа, марганца и кремния. Вариации значений показателей химического состава, закономерности и масштабы их изменений зависят от пространственного положения и литолого-фациальной принадлежности пород, техногенной напряжённости и длительности и степени эксплуатации.

Водозаборы № 1 и № 2 являются примерами эксплуатации подземных вод в сходных природных гидрогеологических условиях с различными последствиями. Подземные воды на водозаборной площадке № 1 испытывают явное влияние техногенного воздействия, но без формального превышения установленных норм ПДК. В тоже время водозабор № 2 не испытывает явных признаков антропогенного загрязнения.

Химический состав подземных вод водозаборов г. Северск
(составлено по данным служб водозаборов 2014 – 2016 гг.)

Показатели	Водозабор № 1			Водозабор № 2		
	Минимальное	Максимальное	Среднее	Минимальное	Максимальное	Среднее
Сухой остаток, мг/дм ³	220	967	390	214	312	251
pH	7	7,6	7,3	6,9	7,4	7,1
Жесткость, мг-экв./дм ³	4,1	6,9	5,1	3,5	6,1	4,2
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	262	386	330	228	366	260
Cl ⁻ , мг/дм ³	2	253	29	2	5,1	2,3
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	2	36	8	2	17,2	5,3
Ca ²⁺ , мг/дм ³	60	242	85	50	81	63
Mg ²⁺ , мг/дм ³	4	34	16	7	28	13
Na ⁺ , мг/ дм ³				1	17	8
Fe _{общ} , мг/дм ³	3	6,7	4,8	1,1	4,5	2,4
Mn ⁺ , мг/дм ³	0,2	0,6	0,4	0,02	0,39	0,24
Si ⁺ , мг/ дм ³	10,3	14,8	12	11	14	12
CO ₂ св., мг/дм ³	44	68	56	38	62	49
Окисляемость, мг O ₂ /дм ³	1,4	4,7	2,4	0,8	2,3	1,5

Водозабор № 1 находится в более напряженной экологической обстановке. В гидрогеологическом разрезе первым от поверхности залегает водоносный горизонт аллювиальных отложений второй надпойменной террасы р. Томи. Он сложен мелкозернистыми песками с линзами глин и суглинков, а в основании представлен гравийно-галечниковым материалом. Воды безнапорные, получающие питание за счет инфильтрации атмосферных осадков и разгрузки нижележащих напорных вод, разгружаются в речную сеть (р. Томь). В силу низкой защищенности подземные воды четвертичных отложений несут основную техногенную нагрузку от соседних промышленных и гражданских сооружений. В естественном состоянии подземные воды являются мягкими, умеренно-жесткими гидрокарбонатными кальциевыми с минерализацией 0,2 - 0,3 г/дм³, и характеризуются нейтральной средой. В газовом составе преобладает азот.

Вторым от поверхности повсеместно залегает водоносный комплекс палеогеновых отложений. Глубина его залегания изменяется от 15 – 20 м на юго-западе до 50 м на северо-востоке. Водовмещающие породы представлены песчаными отложениями различной зернистости и состава.

Общая мощность водоносного комплекса палеогеновых отложений составляет 60 – 120 м. В основании он подстилается глинами люлинворской свиты нижнепалеогенового возраста мощностью 8 – 20 м, которые отделяют его от подземных вод меловых отложений.

Воды палеогенового комплекса напорные, величина напора составляет 10 – 15 м, а в долине р. Томи до 40 м и более. Водоносный комплекс характеризуется высокой водообильностью при средней величине удельных дебитов скважин 2 – 4 л/с. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузки нижележащих водоносных подразделений, а также транзитного потока со стороны Томь-Яйского водораздела. Разгрузка происходит в долине р. Томи (Режимная партия, 1999-2001).

В естественном состоянии подземные воды являются пресными с минерализацией 0,2 - 0,4 г/л, умеренно жесткими. Среда воды нейтральная до слабо щелочной. По химическому составу они гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с повышенным содержанием железа, реже марганца, и повсеместно с недостатком фтора. По составу водорастворенных газов, в основном, азотные. Насыщенность водовмещающих отложений палеогена (особенно новомихайловской свиты) органическими веществами способствует образованию метана в подземных водах в повышенных количествах на отдельных участках. Здесь воды становятся метаново-азотными, что установлено на отдельных участках в долине р. Томи на ее левом берегу [97,99].

Водоносный комплекс палеогеновых отложений оценивается как относительно защищенный, а на отдельных участках и как слабо защищенный от загрязнения с поверхности (ФГУГП «Гидроспецгеология», 1965), [92]. Этому способствует наличие тектонических нарушений в долине р. Томи со значительным смещением отложений палеогенового возраста до 40 - 45 м, что

способствует объединению разновозрастных толщ в единую гидродинамическую систему. Наличие тектонической активности осложняет условия защищенности водоносных подразделений, перспективных для хозяйственно-питьевого водоснабжения, как с поверхности, так и снизу.

На действующих водозаборах регулярно проводятся мониторинговые и тематические исследования различными организациями: ОАО «Северский водоканал», ОАО «Томскгеомониторинг», СХК, ТПУ, ООО «СПЕЦГЕОСТРОЙ» [98].

По результатам режимных наблюдений за период с 1999 по 2000 гг. установлено, что длительная работа водозабора привела к изменению естественной структуры фильтрационного потока подземных вод и формированию депрессионных воронок не только в эксплуатируемом палеогеновом водоносном комплексе, но и в залегающем выше четвертичном водоносном горизонте. В границах площади депрессии оказались многие промышленные объекты (ТПХ, СЗ, РМЗ, ТЭЦ, ГорУАТ, золоотвал, садовые участки, канал забора и сброса речных вод р. Томи, а также водохранилище ВХ-1 СХК), которые могут являться источниками загрязнения подземных вод. Снижение напоров в эксплуатационном водоносном комплексе способствует усилению фильтрации сверху за счёт водоносного горизонта четвертичного горизонта, а в период весеннего паводка не исключается проникновение некондиционных речных вод.

Под влиянием техногенного воздействия увеличивается минерализация от 0,15 - 0,3 г/л до 0,4 - 1,3 г/л. Фиксируется изменение состава подземных вод типичного гидрокарбонатного кальциево-магниевого до гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатного, гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридного и хлоридного со смешанным составом катионов. Основное техногенное загрязнение связано с увеличением в воде концентраций хлоридов, сульфатов, аммония, нитратов, нефтепродуктов и соединений сероводорода.

В водах эксплуатируемого комплекса палеогеновых отложений загрязнение выражается в повышении минерализации, концентрации хлоридов, сульфатов и аммония. Состав вод на таких участках изменился от типичного гидрокарбонатного

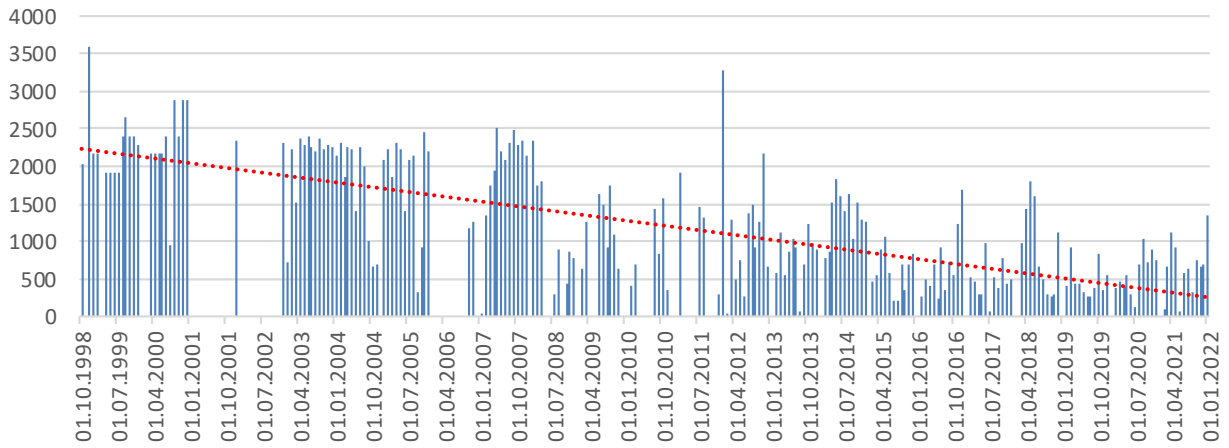
кальциевого до гидрокарбонатно-хлоридного и хлоридного с повышенным содержанием катионов натрия.

В северо-западной части территории водозабора в воде эксплуатационных скважин (№№ 6а, 4, 3, 1а) загрязнение фиксировалось существенно раньше. Начиная с середины семидесятых годов периодически, а с середины восьмидесятых постоянно происходило увеличение минерализации и концентрации хлоридов до концентраций, превышающих ПДК.

Источником поступления хлоридов являлся технологический бассейн подготовки солевого раствора. Это доказано при проведении сотрудниками СХК и ТПУ наземных площадных геофизических работ в 1999 г, по результатам которых установлено направление смещения ореола загрязнения по потоку подземных вод к водозабору.

Механизм поступления соленых вод из верхнего горизонта через защитный экран водоупорных отложений, залегающих в кровле эксплуатируемого водоносного комплекса, может быть связан с неустановленным уменьшением мощности глин до полного их исчезновения на отдельных участках при одновременном усилении процессов миграции сверху вниз вследствие сработки напоров в нижнем водоносном комплексе.

Связь показателей состава подземных вод с гидродинамическим режимом эксплуатации действующих водозаборных скважин прослеживается и в настоящее время. По данным режимных наблюдений нами построены синхронные графики по скважинам: I-1а; I-3; I-4; I-6а (рисунок 77-80), которые показывают наличие зависимости концентраций ионов хлора от интенсивности эксплуатации водозаборных скважин.

Водоотбор из скважины I-1а, м³/сут

Скважина I-1а. Концентрация Cl, мг/л

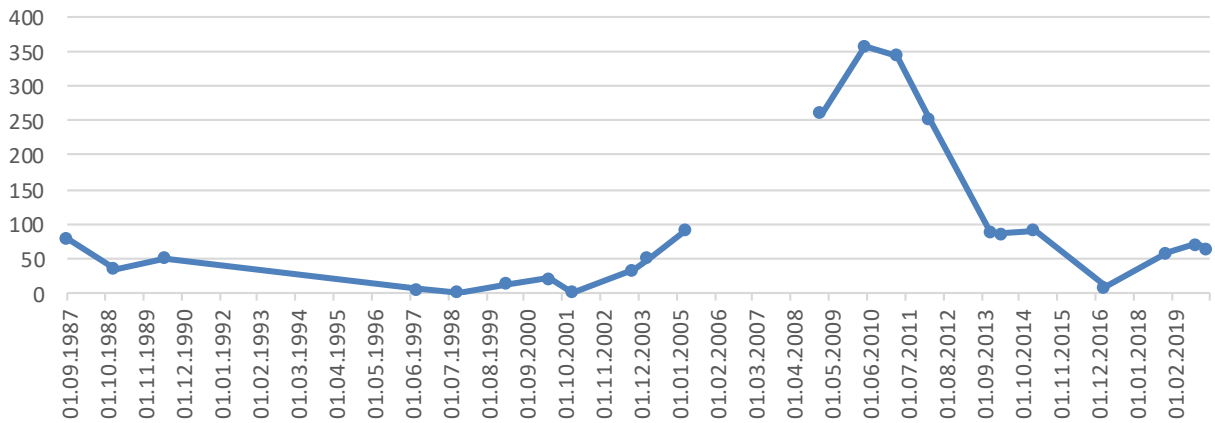


Рисунок – 77 Временная изменчивость водоотбора и концентрации хлор-иона в скважине I-1а.

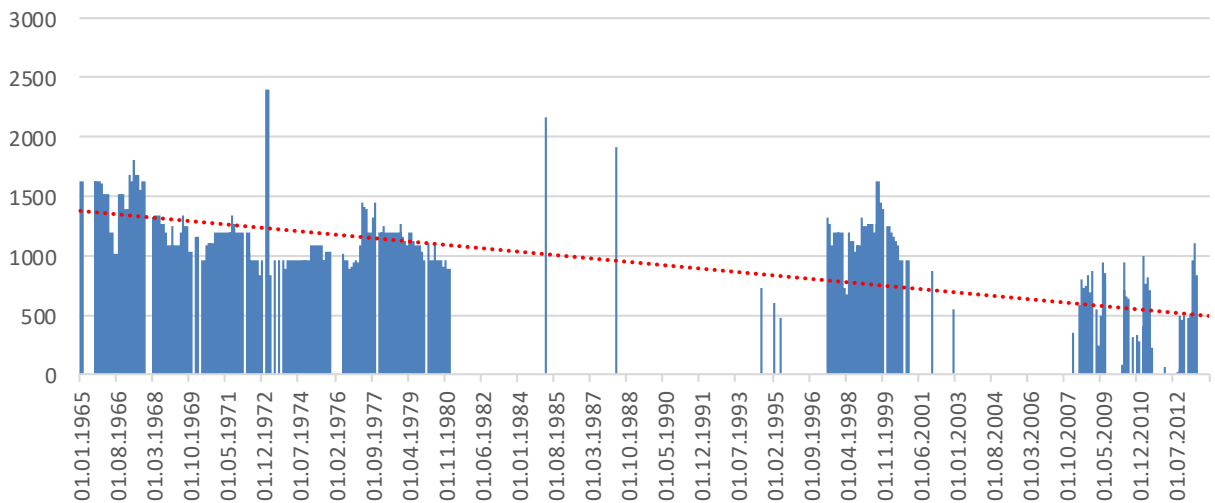
Водоотбор из скважины, I-3 м³/сут



Рисунок – 78 Временная изменчивость водоотбора и концентрации хлор-иона в скважине I-3.

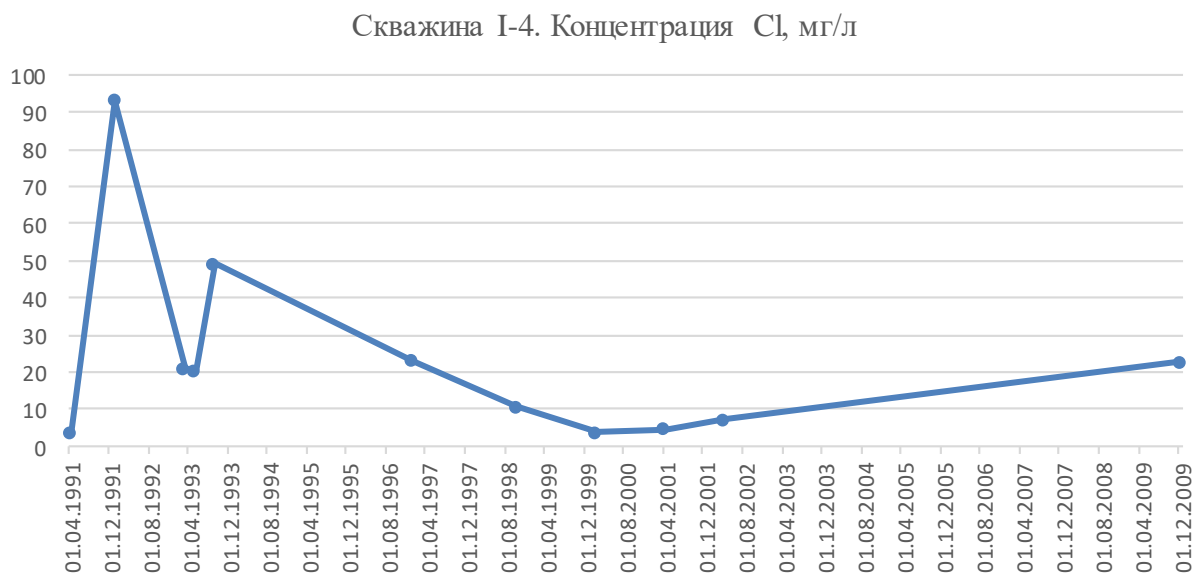


Рисунок – 79 Временная изменчивость водоотбора и концентрации хлор-иона в скважине I-4.

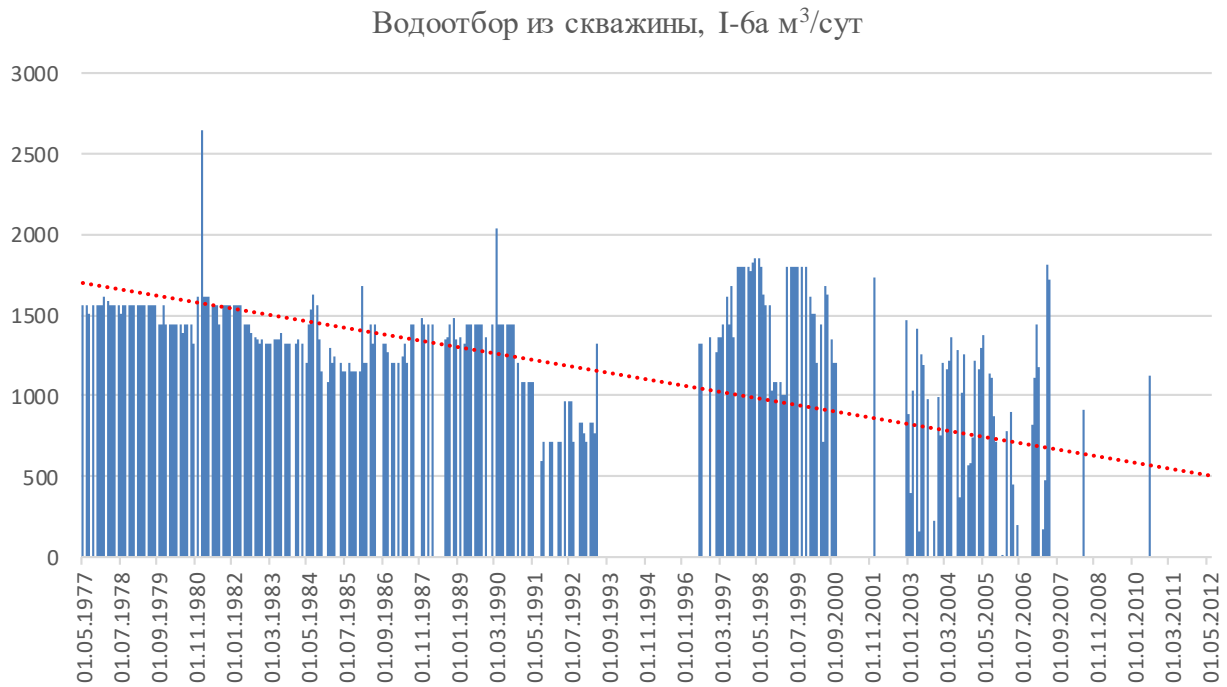


Рисунок – 80 Временная изменчивость водоотбора и концентрации хлор-иона в скважине I-6а.

В этом случае, концентрация хлор-иона выступает в качестве своеобразного индикатора наличия гидродинамической связи верхнего водоносного горизонта с эксплуатационным водоносным комплексом и явным признаком техногенного

загрязнения. В дальнейшем в 2023 – 2024 гг. планируется переоценка запасов месторождений.

Качество подземных вод определяется не только химическим, но и их микробиологическим составом (Шинкаренко В.П., Наливайко Н.Г.). Микроорганизмы являются непременным компонентом природных вод. Они обладают необъятным функциональным разнообразием и способностями и поэтому доминируют в биогеохимических циклах во всех местообитаниях, адаптивно отвечают на изменение среды, тем самым стабилизируют экосистемы, возвращая их в первоначальное состояние. Микробы, как наиболее чувствительные индикаторы изменения среды обитания, могут служить системой раннего предупреждения в биомониторинге любых экологических систем и особенно, при оценке масштабов техногенных изменений гидрогеологических условий территорий и разработке защитных мероприятий экологической направленности [2, 92].

Изучение микрофлоры Северского водозабора проводилось сотрудниками ТПУ регулярно с многоцелевой направленностью, а наиболее полные исследования были выполнены с 1999 по 2001 год (Результаты режимных наблюдений, 1999-2001 гг.). В это время с различной периодичностью были опробованы от 3-х до 25-ти эксплуатационных и наблюдательных скважин, в которых выявлялись индикаторные на химическое и микробиологическое загрязнение физиологические группы микроорганизмов: мезофильные и психрофильные сапрофиты, олиготрофы, нефтеокисляющие, нитрифицирующие, денитрифицирующие, сульфатредуцирующие и железобактерии. Исследование микрофлоры подземных вод выполнялось по общепринятым классическим методикам.

Результаты микробиологического анализа показали, что в воде всех скважин водозабора содержится разнообразная и активная микрофлора. Общее число бактерий составляет от тысяч до первых сотен тысяч кл/мл (таблица 18). Выявленные в подземных водах группы микроорганизмов, за исключением мезофильных сапрофитов, типичны для природных условий, сами по себе безвредны и не представляют опасности для здоровья человека. В то же время

присутствие их в большом количестве в водах хозяйственно-питьевого назначения нежелательно по нескольким причинам.

Таблица 18

Характеристика микробиологического состава эксплуатационных скважин 1 и 2 водозаборов.

Физиологические группы бактерий, кл/мл	Водозабор	Количество микробов			
		Минимальное	Максимальное	Среднее	Количество проб, в которых обнаружены бактерии, в %
Мезофильные сапрофиты	1	10	3750	310	84
	2	10	340	40	47
Психрофильные сапрофиты	1	40	28600	1760	100
	2	20	13920	940	100
Олиготрофы	1	50	29000	1990	100
	2	80	23520	2100	100
Индекс олиготрофности	1	1.2	1.0	1.1	-
	2	1.6	1.3	1.2	-
Аммонифицирующие	1	20	5210	520	77
	2	20	1910	390	65
Нитрифицирующие	1	10	100	60	57
	2	10	100	40	67
Денитрифицирующие	1	10	10000	1050	88
	2	10	10000	320	85
Нефтеокисляющие	1	70	6330	1410	63
	2	10	1770	1050	52
Гетеротрофные железокисляющие	1	40	930	280	52
	2	20	790	230	49
Сульфатвосстанавливающие	1	10	10000	2720	99
	2	10	10000	2580	93
Общее количество, кл/мл	1	1060	256890	14970	100
	2	280	57300	4190	100

Во-первых, при большом скоплении микроорганизмов могут проявляться их персистентные свойства. Во-вторых, метаболиты их жизнедеятельности могут существенно влиять на химический состав природных вод [19, 57]. В-третьих, присутствующие в подземных водах микроорганизмы могут существенным

образом влиять на коррозионные свойства воды, нанося ущерб водопроводным системам.

Сравнительная характеристика микробиологического состава эксплуатационных скважин водозаборов № 1 и № 2 показала, что по микробиологическим показателям для эксплуатационных скважин водозабора № 1 характерно бактериальное загрязнение различного характера. В составе автохтонной микрофлоры наибольшее загрязнение характерно для психрофильных сапрофитов, затем денитрифицирующих и сульфатвосстанавливающих бактерий, и на последнем месте фиксируется загрязнение аммонифицирующими бактериями. Наиболее сильное микробное загрязнение проявляется в водах скважины № 14, где присутствуют все виды бактериального загрязнения.

По количеству психрофильных сапрофитов экологическое состояние эксплуатационных скважин водозабора № 1 характеризуется следующим образом: вода 18% скважин является чистой, 48% скважин являются умеренно загрязненными, 29% - является загрязненной, и 5% скважин имеют грязную воду.

Микробиологический состав подземных вод, добываемых скважинами водозабора № 2, отличается в 10 раз более низким содержанием общего количества микробов. Здесь численность мезофильных сапрофитов на порядок ниже, чем в водах водозабора № 1 и обнаружены они менее, чем в половине изученных скважин. Существенно ниже содержание психрофильных сапрофитов. Кроме того, превышение санитарно-гигиенического норматива по количеству бактерий наблюдается только в 4 из 27 изученных скважин. В то же время по содержанию нитрифицирующих, сульфатвосстанавливающих и гетеротрофных железобактерий отличия являются незначительными.

Данные многолетних режимных наблюдений на водозаборах г. Северска, как и на водозаборе г. Томска свидетельствуют о малом, но достаточно явно проявляющемся в водах эксплуатирующихся горизонтов, снижении концентрации железа (рисунок 81, 82). Этот процесс связан с переходом железа из раствора в твердую фазу за счёт нисходящих вертикальных перетоков из верхних, более обогащенных кислородом горизонтов неоген-четвертичного возраста [73].

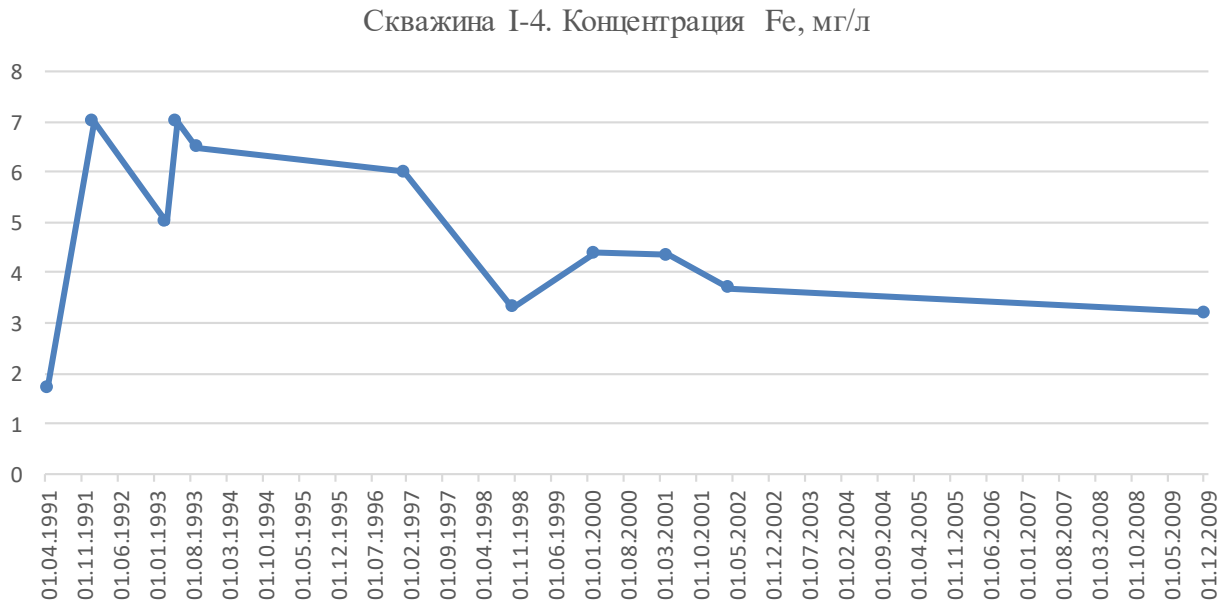


Рисунок – 81 Временная изменчивость концентраций железа общего в эксплуатационной скважине подземного водозабора № 1 г. Северск

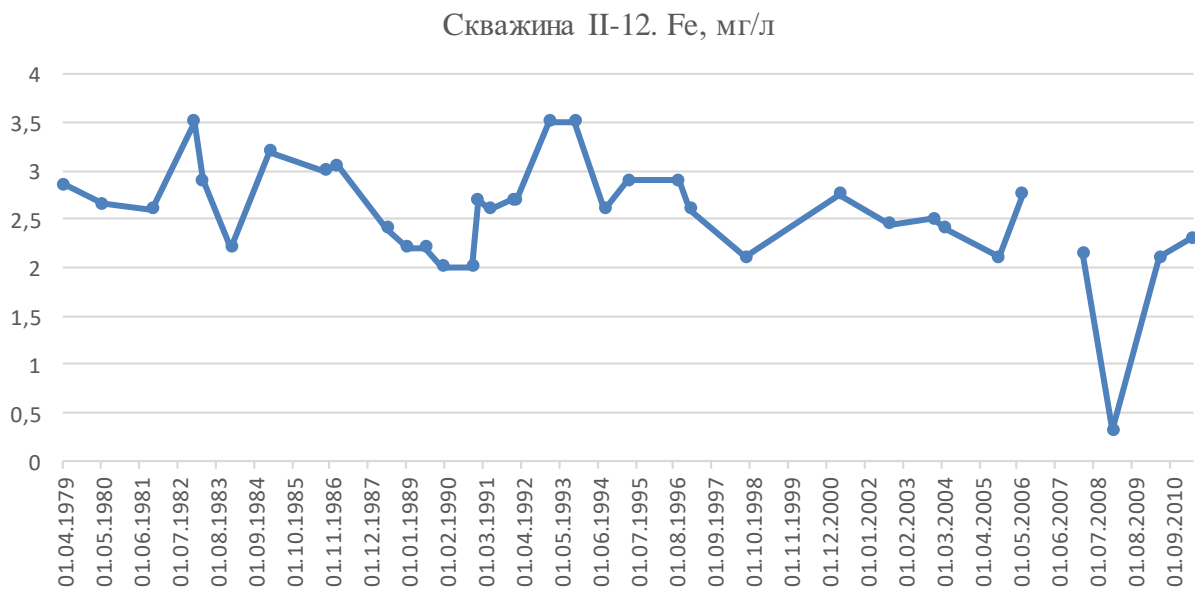


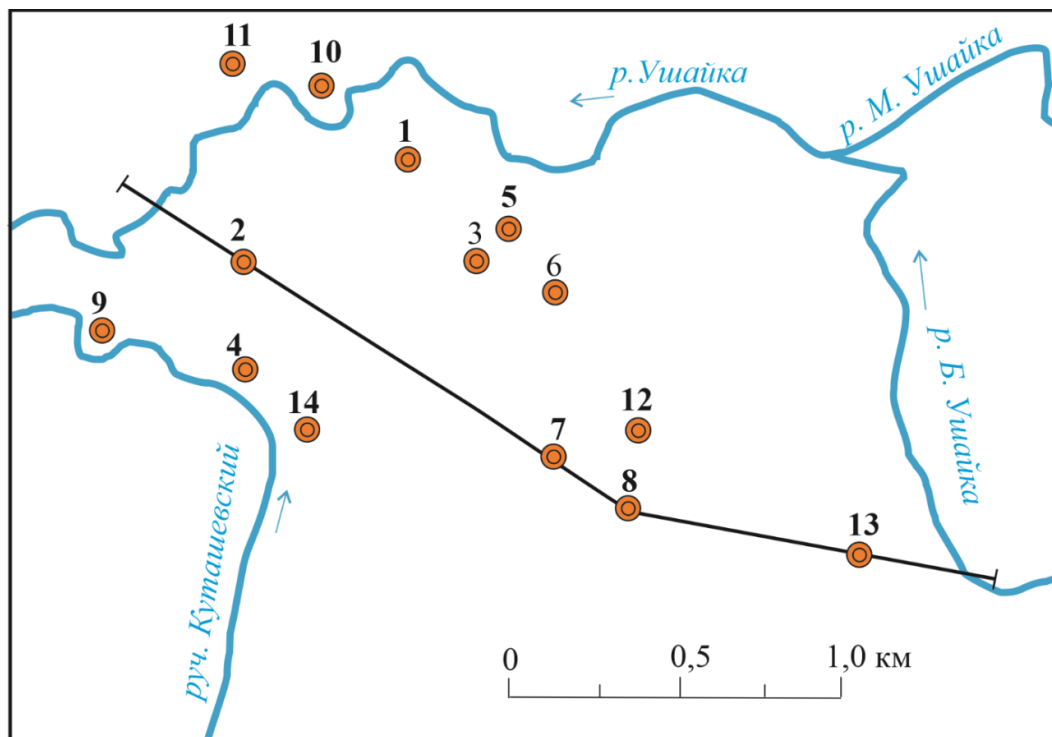
Рисунок – 82 Временная изменчивость концентраций железа общего в эксплуатационной скважине подземного водозабора № 2 г. Северск

Данные длительных режимных наблюдений показывают, что работа водозабора №1 г. Северска в настоящее время вызывает опасения в связи с возможным дальнейшим ухудшением качества добываемых подземных вод. В сложившихся условиях дальнейшая эксплуатация водозабора возможна только при постоянном контроле качественного состава подземных вод и динамических уровней подземных вод с обязательным соблюдением строгих санитарных

требований по содержанию территории водозабора, особенно в границах I-го пояса ЗСО. Необходим жесткий контроль за количеством отбираемой воды, которое установлено лицензионным соглашением. Неконтролируемое увеличение отбора подземных вод приведет к дальнейшему снижению напоров в эксплуатируемом водоносном комплексе и усилению процессов фильтрации некондиционных вод как верхнего горизонта, так и поверхностных вод р. Томи.

5.2.3. Геохимические условия Академического месторождения подземных вод

Водозабор Академического месторождения подземных вод эксплуатируется с 1974 г., обеспечивая водой питьевого качества микрорайон Академгородка с населением 6000 человек. Групповой водозабор в разное время объединял работу от четырех до тринадцати гидрогеологических скважин, расположенных на одной водозаборной площадке размером полтора на два километра с максимальным расстоянием до пятисот метров между отдельными водозаборными сооружениями, глубина которых достигает 110 м (рисунок 83, 84). Фильтры скважин расположены на глубинах от 14 до 80 м. В качестве водоподъемного оборудования использованы погружные скважинные насосы, глубина установки которых изменяется в пределах от 45 до 85 м [21, 106, 108, 111, 112, 115, 117, 120].



Рисунок–83 Схема размещения скважин водозабора [8]

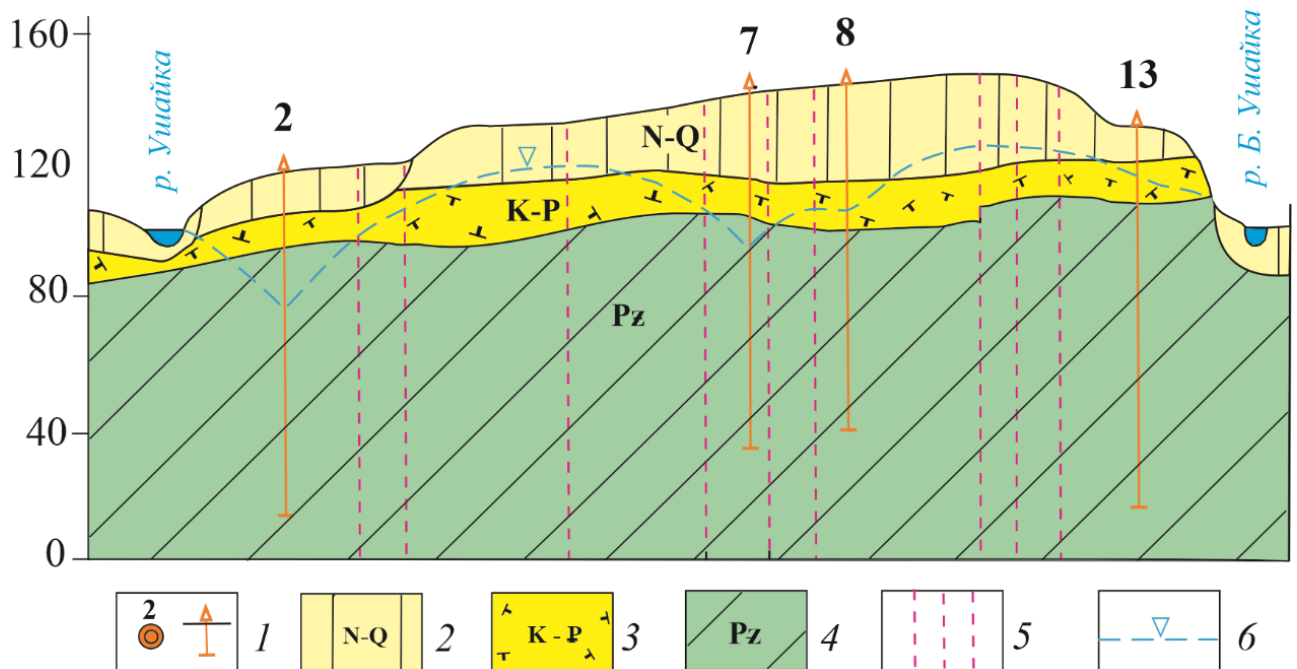


Рисунок – 84 Схематический гидрогеологический разрез в пределах Академического месторождения (фактические материалы В.Л. Карлсон, 1990, Е.М. Дутова 1990):

1 – эксплуатационная скважина и её номер; 2, 3 – водоносные комплексы: 2 – неоген-четвертичных отложений, 3 – палеозойских отложений; 4 – кора выветривания; 5 – разрывные нарушения; 6 – положение подземных вод

Водовмещающие породы эксплуатационной части гидрогеологического разреза приурочены к интервалу зоны экзогенной трещиноватости, затухающей с глубиной [18, 33]. Поэтому производительность водозаборных скважин существенно изменяется как по площади водозаборного участка, так и по времени эксплуатации отдельных гидрогеологических скважин в диапазоне от 100 до 400 м³/сут. Это определяет и колебание суммарного дебита водозабора от 2380 до 3165 м³/сут, который в среднем характеризуется величиной 2560 м³/сут.

С точки зрения геологического строения месторождение подземных вод входит в границы Колывань-Томской складчатой зоны. Водовмещающие горные породы, рассечённые дайками пермо-триасового возраста, представлены трещиноватыми толщами водоносного комплекса ниже-каменноугольных отложений с многочисленными тектоническими нарушениями. Мощность водовмещающих отложений сильно изменчива и, по данным геофизических

исследований, колеблется в широких пределах от 9 до 85 м. Гидрогеологический разрез характеризуется чрезвычайно высокой степенью неоднородности фильтрационных свойств, заметно изменяющихся по площади месторождения. Различия в количественных показателях водообильности горных пород, таких как расходы отдельных гидрогеологических скважин, и их удельные дебиты по разным участкам площади водозабора могут достигать двух математических порядков.

По данным разведочных работ, выполненных ранее, установлено, что наиболее водообильная часть гидрогеологического разреза приурочена к зоне экзогенной трещиноватости и тектоническим нарушениям. Для этих участков месторождения характерны удельные дебиты скважин, изменяющиеся в пределах 0,3–2,1 л/с при их производительности 5,7–23,0 м³/с, что обусловлено высокой водообильностью водовмещающих отложений.

По качеству пресные подземные воды характеризуются преимущественно гидрокарбонатным анионным составом с различным процентным соотношением катионов кальция и магния. Отмечается повышенная жёсткость подземных вод от градации умеренно жёсткой до жёсткой. Состав подземных вод по основным показателям соответствует общим региональным особенностям и в целом вписывается в типичную характеристику подземных вод ландшафтной зоны тайги Колывань-Томской складчатой зоны.

Анализ длительных режимных гидрогеохимических наблюдений позволяет выделить некоторые важные закономерности изменения химического состава подземных вод, которые находятся в тесной зависимости от литологического состава водовмещающих отложений, генетического типа подземных вод и сезонных колебаний их уровня [20, 68, 70, 105]. Перечисленные факторы с разной степенью интенсивности проявляются на различных участках площадного водозабора, что позволяет объединить эксплуатационные скважины в три группы. Такое условное разделение водозаборных скважин предполагает, что отмеченные различия, зафиксированные в особенностях химического состава, являются не случайными, а унаследовано отражают особенности гидрогеологического разреза и условия формирования подземных вод.

К группе № 1 отнесены эксплуатационные скважины, вскрывшие подземные воды преимущественно тектонических нарушений, характеризующиеся повышенной водообильностью. По химическому составу подземные воды, получаемые из этих скважин, имеют относительно высокую минерализацию и характеризуются повышенной концентрацией углекислоты, ионов железа и марганца. Для них характерен повышенный уровень жёсткости. Отмеченные показатели часто превышают предельно допустимые концентрации, установленные для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Ко второй группе отнесены скважины, которые добывают воду с минимальной минерализацией. Как правило, в подземных водах этих скважин одновременно фиксируется самый низкий уровень жёсткости. Это позволяет с высокой степенью вероятности предположить, что подземные воды на этом участке имеют тесную связь с поверхностными водными объектами. Дополнительно в пользу наличия такой связи свидетельствует то, что в химическом составе обнаруживаются загрязнители, типичные для поверхностных вод, хотя и в количествах, не превышающих норм для воды питьевого качества.

К третьей группе отнесены скважины, в которых показатели химического состава подземных вод занимают промежуточное положение по гидрогеохимическим критериям первой и второй групп. Это позволяет предположить, что скважины данной группы эксплуатируют подземные воды зоны экзогенной трещиноватости, имеющей региональное распространение.

Особенностью химического состава подземных вод этой группы скважин является их удовлетворительное качество за исключением некоторых показателей, среди которых превышают предельно допустимые концентрации питьевых кондиций ионы железа и марганца, показатели окисляемости и жёсткости (таблица 19). Превышение установленных норм по железу и марганцу фиксируется практически постоянно, а по отношению к показателям жёсткости и окисляемости только периодически и не по всем скважинам группы.

Под влиянием длительной эксплуатации месторождения подземных вод на территории водозаборного участка сформировалась депрессионная воронка,

размеры которой оцениваются площадью в 2,5 км².

Таблица 19

Характеристики состава подземных вод по данным мониторинговой службы
водозабора

Параметры	1999-2005			2014-2019			2014-2019		
	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.
Температура, °С	6,1	4,7	6,9	5,9	4,7	6,6	6,7	5,3	7,2
Сухой остаток, мг/дм ³	393,8	312,7	526,5	409,3	343,1	513,8	431,4	353,3	581,9
рН, ед.	7,2	6,9	7,6	7,3	7,0	7,5	7,3	7,0	7,5
Жесткость общая, мг-экв/л	7,1	5,4	9,5	6,8	5,7	8,4	6,8	5,5	8,5
НСО ₃ ⁻ , мг/дм ³	417,7	374,7	450,5	413,1	360,9	464,6	403,3	308,0	464,2
СГ, мг/дм ³	2,9	0,9	6,5	3,9	1,5	7,8	4,9	1,2	11,8
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	17,5	0,8	51,3	22,8	0,4	50,6	16,5	3,6	32,3
Ca ⁺ , мг-экв/л	5,3	4,4	6,6	5,4	4,7	6,7	5,4	4,5	6,5
Mg ⁺ , мг-экв/л	1,8	0,8	3,1	1,4	0,8	1,9	1,4	0,7	2,2
Fe ⁺ общ, мг/дм ³	2,2	0,8	4,4	2,8	0,8	6,4	2,6	0,7	5,8

Увеличение площади распространения ограничено в восточном и северном направлениях в силу наличия тесной гидродинамической связи подземных вод с поверхностными водами рек Ушайка и Большая Ушайка. При этом максимальные величины понижения уровня подземных вод в отдельных наиболее нагруженных скважинах достигают 17–23 м. Эксплуатация подземных вод осуществляется преимущественно в условиях безнапорного фильтрационного потока, проявления местного напора встречаются только на отдельных участках. В таких гидродинамических условиях снижение уровня подземных вод под воздействием водоотбора сопровождается осушением водовмещающих пород в зоне аэрации. Режим работы эксплуатационных скважин нельзя считать непрерывным. Общий дебит водозабора сохраняет своё постоянство, но перераспределяется между разными водозаборными скважинами. Периодические остановки насосного оборудования сопровождаются восстановлением уровня подземных вод, что

определяет особый режим аэрации верхней части гидрогеологического разреза в окрестностях активных эксплуатационных скважин.

Ранее нами было установлено, что аэрация гидрогеологического разреза, связанная с изменением гидродинамических условий при эксплуатации подземных вод, является одним из ведущих факторов, который определяет эволюцию состояния системы «вода–порода». Она вызывает интенсификацию физико-химических процессов и приводит к направленному изменению гидрогеохимических условий, определяющих техногенный характер эволюции химического состава подземных вод.

Процесс аэрирования подземных вод в непосредственной близости от водозаборной скважины при её периодических остановках приводит к переходу растворённого железа в твёрдую фазу [41, 102, 110, 114, 118]. Длительная работа водозабора Академического месторождения подземных вод показывает, что этот процесс не только имеет место на практике, но и уверенно фиксируется падением концентрации железа в подземных водах, поступающих на головные сооружения водозабора для водоподготовки (рисунок 85).

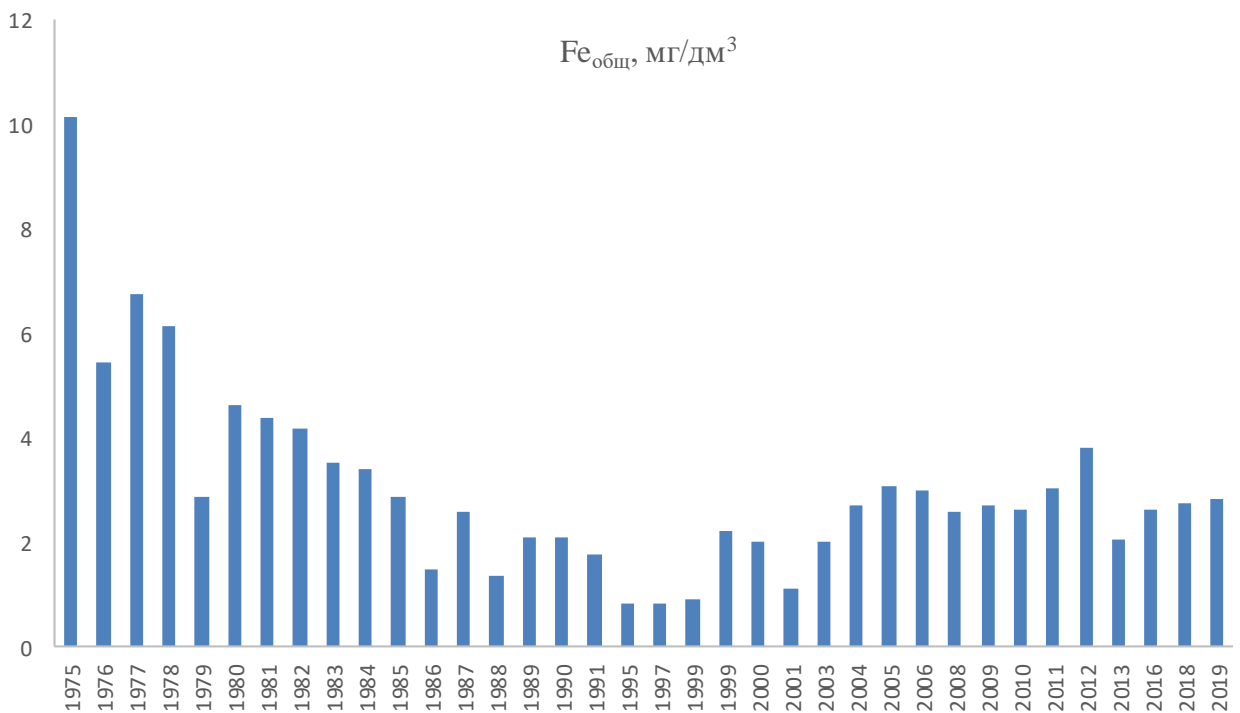


Рисунок – 85 Временная изменчивость железа общего

На графике видно, что наиболее интенсивное сокращение концентрации общего железа с 10 до 2–4 мг/дм³ в водах месторождения приходится на первые несколько лет активной работы водозабора. Затем в период с 1980 по 1997 гг. фиксируется постепенное, достаточно равномерное снижение содержания до концентраций менее 0,1 мг/дм³. Затем наблюдается возрастание концентраций железа на протяжении 8 лет, достигающих к 2005–2006 гг. значений 3–3,5 мг/дм³, переходящего в достаточно стабильное состояние с колебаниями в пределах 1–1,5 мг/дм³ и незначительной тенденцией к снижению.

С высокой долей вероятности можно предположить, что эксплуатация Академического месторождения подземных вод приводит к активизации процессов окисления в зоне аэрации не только железа, но и сульфидов. Наличие исходного материала для такого окислительного процесса объясняется известным фактом региональной пиритизации палеозойских образований фундамента. Окислительные процессы с течением времени приводят к устойчивому росту концентрации сульфат-иона в подземных водах эксплуатационных скважин (рисунок 86).

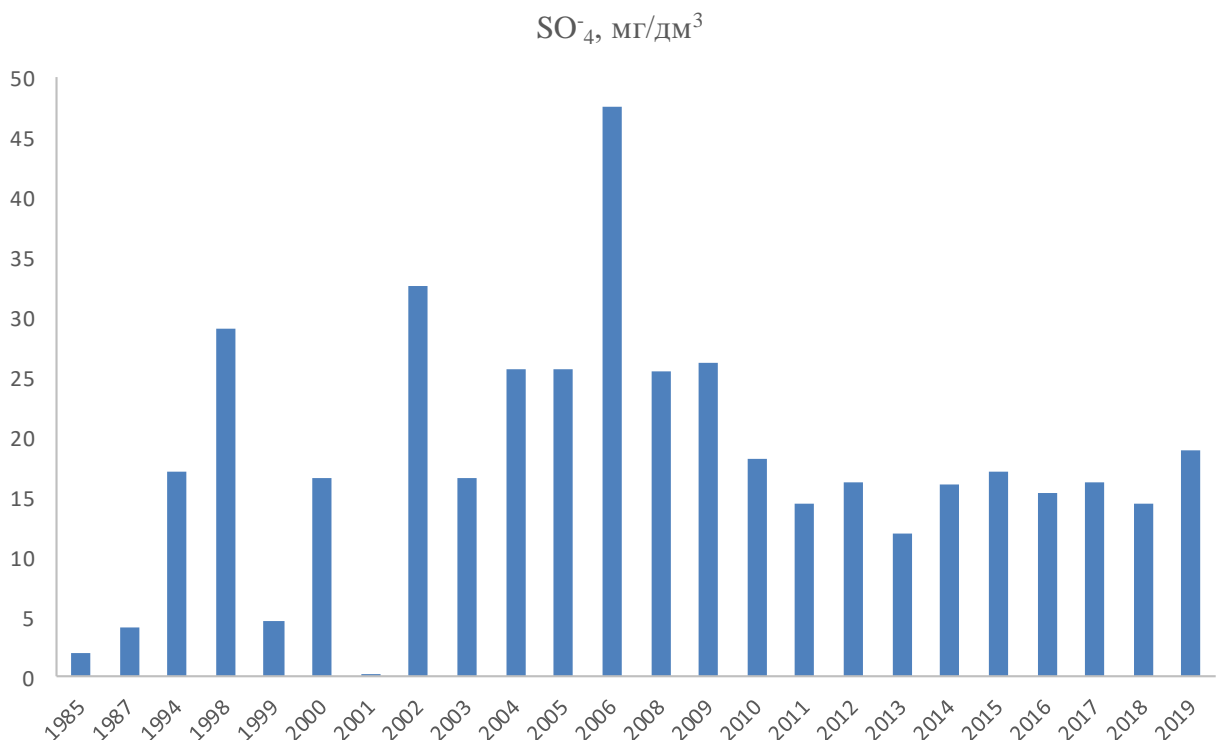


Рисунок – 86 Временная изменчивость сульфат-иона

Наиболее интенсивный рост содержания компонента в водах приурочен к периоду эксплуатации водозабора до 2006 г. Концентрации с минимальных значений 1–3 мг/дм³ достигают 45–47 мг/дм³ в течение 22 лет. Затем содержание сульфат-иона на протяжении 6–7 лет снижается до уровня 11–15 мг/дм³ и с незначительными колебаниями остается на уровне 16–19 мг/дм³.

Процесс окисления сульфидов провоцирует другой, сопряжённый с ним, эффект снижения показателя рН. По всем эксплуатационным скважинам прослеживается подкисление подземных вод от слабо щелочных и нейтральных до слабо кислых (рисунок 87).

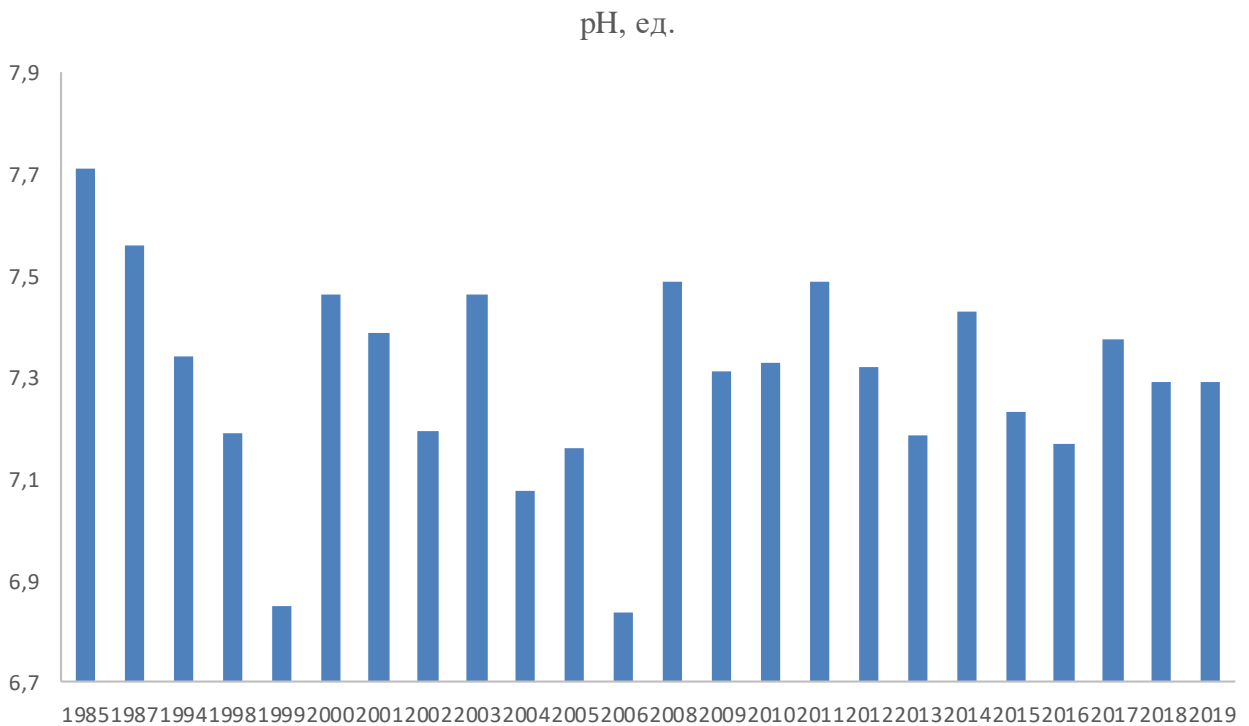


Рисунок – 87 Временная изменчивость рН

График изменчивости рН вод месторождения показывает достаточно широкий диапазон колебания в период 1985–2006 гг. в пределах 6,8–7,7 ед. Однако тенденция к снижению величины прослеживается достаточно четко. С 2008 г. по настоящее время общий тренд снижения величины рН сохраняется при диапазоне изменчивости 7,15–7,5 ед.

Отмеченные изменения гидрогеохимической обстановки и рост содержания сульфат-иона приводят к интенсификации продуцирования комплексных соединений, что способствует дополнительному росту и усилению миграционной

способности химических элементов (рисунок 88). Результаты этих взаимосвязанных процессов приводят к общему росту концентраций компонентов химического состава подземных вод, что в свою очередь приводит к более активному переходу ионов кальция и магния в раствор. Эти тенденции изменения качества подземных вод находят отражение в результатах режимных гидрогеохимических наблюдений в виде роста не только концентраций сульфат-иона, но и в некотором увеличении общей жёсткости подземных вод [100, 107, 113, 114, 116, 119].



Рисунок – 88 Изменение величины общей жесткости подземных вод

Увеличение общей жесткости подземных вод до 2003 г. с 5,7 до 7,6 мг-экв/дм³ сменяется снижением показателя до 6,5–7 мг-экв/дм³ к 2009–2010 гг. и остается в этих пределах с небольшой тенденцией к росту.

Анализ длительной эксплуатации водозабора Академического месторождения подземных вод показывает, что под влиянием водоотбора в ближайших окрестностях эксплуатационных скважин активизируются процессы аэрации подземных вод, что сопровождается формированием окислительной обстановки и способствует переходу ионов железа из природного раствора в твёрдую фазу. Своеобразным катализатором этих окислительных процессов служит особый «рваный» режим эксплуатации

водозаборных скважин с периодическими остановками. В условиях безнапорного характера фильтрации при снижении уровня подземных вод в границах депрессионной воронки временно увеличивается мощность аэрации до 17–23 м в наиболее нагруженных скважинах. Во время остановки насосного оборудования этот осушенный объём горных пород заполняется водой, имеющей возможность обогащения кислородом воздуха. Таким образом, в окрестностях водозаборных скважин постоянно работают подобия своеобразных насосов, прокачивающих подземные воды через участки зоны аэрации в вертикальном направлении. Этим явлением можно объяснить интенсификацию процессов аэрации подземных вод, которая приводит к изменению природных гидрогеохимических условий под влиянием работы водозабора. В результате происходит выделение углекислоты и ионов водорода, что способствует повышению показателя кислотности водной среды. В свою очередь происходит окисление сульфидов, присутствующих в составе водовмещающих горных пород палеозойского фундамента, которое сопровождается переходом сульфат-иона в раствор. Одновременно с этим повышается растворимость карбонатов, что в конечном итоге способствует увеличению жёсткости подземных вод.

На водозаборных участках, приуроченных к зонам экзогенной трещиноватости, аэрация гидрогеологического разреза на локальных участках размещения водозаборных скважин может приводить к долговременным и заметным изменениям в химическом составе подземных вод. Интенсивность влияния этого фактора контролируется изменяющимся во времени объемом водоотбора и неравномерным распределением нагрузки по объектам водозабора, что явно фиксируется на графиках изменчивости состава подземных вод. Тем не менее общие тренды основных направлений изменчивости химического состава, такие как: снижение содержания общего железа, рост концентрации сульфат-иона, рост общей жесткости, снижение величины рН, установленные ранее проведенными исследованиями, могут сохраняться в течение длительного времени.

Материалы гидрогеологических исследований на действующих водозаборах Томской области показывают, что не все особенности гидрогеохимических условий с достаточной полнотой учитываются на стадии разведочных работ. Если с позиций количественной оценки подсчета запасов подземных вод существующие приемы схематизации гидрогеологических условий дают удовлетворительные результаты в рамках аналитических расчетных схем, то вопросы прогноза качественного состава подземных вод под влиянием длительной эксплуатации водозаборных скважин остаются в тени.

Анализ опыта эксплуатации ресурсов водоносного комплекса палеогеновых отложений на территории Томской области дает основание утверждать, что последствия длительного (в рамках амортизационного срока работы водозабора) гидродинамического воздействия на подземные воды могут быть успешно воспроизведены на геомиграционных моделях, что резко повышает достоверность прогнозов изменения гидрогеологических условий на месторождениях подземных вод, вовлекаемых в эксплуатацию.

По результатам вышеизложенного можно сделать вывод, что в естественных условиях химический состав и качество подземных вод палеогеновых отложений, использующихся на большей части территории Томской области для хозяйственно-питьевого водоснабжения, формируются под влиянием ландшафтно-климатических условий, литологического состава пород водоносного комплекса и перекрывающих отложений. Наименее минерализованные воды формируются в условиях среднетаежных ландшафтов в отложениях континентального генезиса, перекрытых преимущественно песчаными и супесчаными осадками (развиты на 10 % площади), а наиболее минерализованные воды встречаются в условиях южно-таежных ландшафтов, в отложениях прибрежно-морского и морского генезиса, перекрытых преимущественно глинистыми и суглинистыми осадками. На остальной территории подземные воды палеогеновых отложений характеризуются промежуточными величинами минерализации. На локальных участках

установлено наличие благоприятных условий для разгрузки подземных вод меловых отложений, залегающих ниже по разрезу, и имеющих более высокую минерализацию. По результатам проведенного морфоструктурно-гидрогеологического анализа суммарная территория таких участков достигает 5%, а закартированная, основанная на фактических данных, площадь таких аномалий не превышает 1%.

При этом эксплуатация подземных вод палеогеновых отложений сопровождается изменением параметров среды и миграционной способности переменного-валентных химических элементов с привлечением некондиционных вод из смежных горизонтов, что при интенсификации водоотбора приводит к изменению качества добываемых вод. В условиях среднетаежных ландшафтов в эксплуатируемых водах (Стрежевское месторождение) увеличиваются, а в условиях южно-таежных ландшафтов (Томское, Северское месторождения) наоборот уменьшаются содержания железа, появляются индикаторы загрязнения – хлориды, атипичный микробиологический состав (Северское месторождение, 1-ый водозабор), активизируются перетоки вод из меловых отложений, фиксирующиеся повышенными аномалиями хлора и величины общей минерализации (Томское месторождение). Степень проявления изменений состава определяется интенсивностью вертикальных перетоков, количественная оценка которых может быть установлена с применением гидродинамических расчетов и численного моделирования.

Эксплуатация месторождений подземных вод в условиях складчатого обрамления Алтае-Саянской области, при интенсификации водоотбора активизирует окисление сульфидов в зоне аэрации и в толще пиритизированных водовмещающих пород. Подкисление вод и появление в их составе более высоких концентраций сульфат-иона усиливают миграционную способность элементов и повышают растворимость карбонатных минералов. Поэтому, при эксплуатации подземные воды способны увеличивать концентрации растворённых элементов, в том числе повышающих

нормируемый показатель общей жесткости, иногда выше предельно допустимых значений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой хозяйственно-питьевого водоснабжения населения Томской области из подземных источников являются водоносный комплекс палеогеновых отложений и водоносный комплекс складчатого обрамления АСО (юг Томского района Томской области). Зональное изменение природно-климатических условий территории исследования определяет в пределах ландшафтных зон широтную гидрогеохимическую зональность подземных вод в соответствии с хорошо известными общими закономерностями, согласно которым наиболее минерализованные и щелочные подземные воды формируются в обстановках лесостепи и южной тайги, а наиболее пресные и кислые – в подзоне средней заболоченной тайги. Помимо ландшафтно-климатического фактора на состав вод оказывает влияние режим водообмена, обусловленный, в значительной степени, литологическим составом водовмещающих отложений континентального, прибрежно-морского и морского генезиса. В условиях тесной гидрогеодинамической связи вод комплекса с водами перекрывающих отложений состав этих отложений также оказывает заметное влияние на водообмен и, как следствие, геохимический состав вод.

Наряду с этим прослеживается вертикальная гидрогеохимическая зональность, в соответствии с которой в водах, приуроченных к нижележащим горизонтам комплекса увеличивается концентрация ионов хлора и натрия, повышается общая минерализация вод.

В пределах отдельных участков объекта исследования, приуроченных к долинам крупных рек, ассоциированных с тектоническими нарушениями, отмечаются значительные повышения как общей минерализации вод (до нескольких грамм на дм^3), так и минерализации отдельных компонентов химического состава, сопровождаемый сменой гидрогеохимического типа вод с типичного гидрокарбонатного (с вариациями содержания кальция и магния) на хлоридный натриевый.

Длительная активная эксплуатация крупных месторождений подземных вод, приуроченных к палеогеновым отложениям в пределах распространения южно-таежных ландшафтов приводит к интенсификации разгрузки вод из нижележащих водоносных горизонтов с повышенными концентрациями компонентов химического состава. Одновременно происходит подтягивание аэрированных вод из перекрывающих отложений, приводящих к смене гидрогеохимических сред и, как следствие, ухудшению как условий эксплуатации гидротехнических сооружений, так и ухудшению качества воды.

Ведущим фактором формирования эксплуатационных запасов подземных вод является возможность их восполнения за счет емкостных запасов эксплуатационного водоносного комплекса палеогеновых отложений и привлекаемых ресурсов неоген-четвертичного водоносного комплекса, которые составляют подчиненную, но значительную часть в суммарном водоотборе эксплуатационных скважин. В свою очередь запасы подземных вод неоген-четвертичного водоносного комплекса пополняются избыточным (по сравнению с величиной испарения) количеством атмосферных осадков и обеспечены влиянием питающих границ (первого рода), представленных многочисленными (и обширными по площади) болотными массивами и другими поверхностными водоемами и водотоками. Обширные болотные массивы способствуют формированию восстановительной геохимической обстановки водной среды, которая под влиянием разницы напоров за счет создания депрессии в эксплуатационном водоносном комплексе, способна оказывать влияние на изменение условий водной среды в нижних частях гидрогеологического разреза в зоне работы фильтров водозаборных скважин. Объемы перетекания, формирующиеся под влиянием работы группового водозабора непостоянны во времени в связи с выявленными тенденциями изменения водопотребления. Количественная оценка объемов перетекания и их изменения во времени поддается количественному учету с использованием численного моделирования.

На водозаборных участках, приуроченных к зонам экзогенной трещиноватости горно-складчатого обрамления, аэрация гидрогеологического разреза на локальных участках размещения водозаборных скважин может приводить к долговременным и заметным изменениям в химическом составе подземных вод. Интенсивность влияния этого фактора контролируется изменяющимся во времени объемом водоотбора и неравномерным распределением нагрузки по объектам водозабора, что явно фиксируется на графиках изменчивости состава подземных вод. Тем не менее, общие тренды основных направлений изменчивости химического состава, такие как: снижение содержания общего железа, рост концентрации сульфат-иона, рост общей жесткости, снижение величины рН, установленные ранее проведенными исследованиями, могут сохраняться в течение длительного времени.

Эксплуатация месторождений подземных вод, водовмещающие породы которых пиритизированы, активизирует и окисление сульфидов в зоне аэрации и водосодержащей толще. Окисление сульфидов сопровождается подкислением вод, которое способствует повышению растворимости карбонатных минералов. Повышение концентраций сульфат-иона, в свою очередь, активизирует образование комплексных соединений, что усиливает миграционную способность элементов. Таким образом воды способны содержать большие количества элементов, в том числе повышающих общую жесткость и минерализацию.

Полученные автором результаты могут быть использованы при решении проблемам экологической безопасности и вопросов хозяйственно-питьевого водоснабжения, направленных на разработку его перспективных планов, при мониторинге экологического состояния окружающей среды, а также в качестве основы для районирования территории по условиям и интенсивности загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балобаненко А. А. Геохимические особенности подземных вод хозяйственно-питьевого назначения юга Западно-Сибирского артезианского бассейна: диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.07 / Балобаненко Андрей Александрович. – М., 2018 – 188 с.
2. Бойченко М. Н., Зверев В. В., Несвижский Ю. В., Богданова Е. А., Буданова Е. В., Карамзин А. М., Кравцова Е. О., Усатова Г. Н., Кафарская Л. И. Микробиология, вирусология: Руководство к практическим занятиям / – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: ООО Издательская группа "ГЭОТАР-Медиа", 2022. – 408 с.
3. Бочаров В. Л., Савченко О. В. Гидрогеологические условия и оценка эксплуатационных запасов подземных вод бассейна реки Становая Ряса (Липецкая область) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 2. – С. 104-108.
4. Бочаров В. Л., Селезнев К. А. Геохимия стронция в подземных водах в юго-западной краевой части московского артезианского бассейна (Орловская область) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2012. – № 2. – С. 179-189
5. Бочаров В. Л., Строгонова Л. Н., Овчинникова Е. С. Проблемы изучения и использования ресурсов подземных питьевых вод Воронежской области. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2010. – № 1. – С. 243-251.
6. Вернадский В. И. История природных вод / Под. ред. С. Л. Шварцева, Ф. Т. Яншиной. М.: Наука, 2003
7. Волкотруб Л. П. Питьевая вода Томска. Гигиенический аспект / Л. П. Волкотруб, И. М. Егоров. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 196 с.
8. Вологодина И. В., Дутова Е. М., Покровский Д. С., Покровский В. Д., Радюк И. В. Природно-техногенные минеральные новообразования на водозаборах Томской области. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2015. – № 3. – С. 58-72.

9. Временное положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (подземные воды). МПР России, 1998.
10. Гавич И. К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. – Недра, 1980.
11. Гаев А.Я., Алферов И.Н., Килин Ю.А., Куделина И.В. О проблеме питьевых вод на урбанизированных территориях // Экологические проблемы промышленных городов. Сборник научных трудов по материалам 7-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2015. – С. 259-263.
12. Гаев А.Я., Куделина И.В., Леонтьева Т.В., Алферов И.Н., Савилова Е.Б. Проблемы воды, здоровья и безопасности оренбуржцев в перспективе // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2013. – Т. 1. – № 4 (14). – С. 20-24.
13. Гаев А.Я., Савилова Е.Б. Об обеспечении экологической безопасности водозаборов хозяйственно-питьевого назначения нефтедобывающих районов оренбуржья // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности – 2017. – Т. 25. – № 2. – С. 294-305.
14. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 368 с.
15. Гаррелс Р. Минеральные равновесия. М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. 306 с.
16. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 1: Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование. / Отв.ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
17. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 2: Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза. / Отв.ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 389 с.
18. Гидрогеология СССР. Том 16, Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / Под ред. В. А. Нуднера – М.: Недра, 1970 – 368 с.

19. Горленко В.М. Экология водных микроорганизмов / В.М. Горленко, Г.А. Дубинина, С.И. Кузнецов. – М.: Наука, 1977. – 288 с.
20. Дутова Е.М., Кузеванов К.И., Кузеванов К.К. Гидродинамическое обоснование изменений гидрогеохимических условий Стрежевского месторождения подземных вод (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – №. 9. – С. 204-220.
21. Дутова Е.М., Покровский Д.С., Парначев В.П., Покровский В.Д. Геохимические особенности подземных вод хозяйственно-питьевого назначения республики Хакасия // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 394. – С. 239-249.
22. Дутова Е.М. Радиогидрогеология и гидрогеохимия (курс лекций). – Томск: Изд-во ТПУ, 2008
23. Евсеева Н. С. и др. География Томской области: Природные условия и ресурсы. – 2001.
24. Ермашова Н.А. Никонов Б.С. Обобщение материалов по химическому составу питьевых подземных вод в связи с повышенным содержанием в них железа, марганца и других специфических для региона компонентов в пределах юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна. Томск, 1982.
25. Ермашова Н.А. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена Томской области в связи с решением вопросов водоснабжения и охраны // Автореферат диссертации канд. геол.-мин. наук. Томск, 1998. 44 с.
26. Ермашова, Н. А. Подземные воды отложений верхнего мела и их роль в формировании запасов Томского водозабора / Н. А. Ермашова, Д. С. Покровский, Г. М. Рогов // Проблемы геологии Сибири : тез. докл. науч. конф., посвящ. 75-летию геолог. образования в ТГУ, 3–5 апр. 1996. – Томск, 1996. – Т. 2. – С. 300–301.
27. Ермашова, Н. А. Эколого-гидрогеологические проблемы использования подземных вод в зоне сочленения Западно-Сибирского артезианского бассейна и Колывань-Томской складчатой области / Н. А. Ермашова, Д. С. Покровский, Г. М. Рогов // Природокомплекс Томской области. – Томск : Изд-во ТГУ, 1995. – Т. 2 : Биологические и водные ресурсы. – С. 109–115. – Библиогр.: 8 назв.

28. Ермашова, Н. А. Эколого-гидрогеологические аспекты хозяйственно-питьевого использования подземных вод юго-востока Западной Сибири (Томская область) / Н. А. Ермашова, Д. С. Покровский, Г. М. Рогов // Подземные воды Востока России : материалы XV Всерос. совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, 7–9 окт. 1997 г. / Тюм. гос. нефтегаз. ун-т. – Тюмень, 1997. – С. 62.
29. Зуев В.А. Бычков В.Я., «Эколого-геохимическая оценка состояния и качества подземных вод Томского водозабора», Научный отчет, 1994.
30. Зуев В.А. Химический состав подземных вод Томского водозабора / В.А.Зуев, О.В.Картавых, С.Л.Шварцев // Обской вестник. 1999. № 3–4. с. 69–77
31. Казак Е.С., Поздняков С.П. Моделирование внутрипластового обезжелезивания подземных вод. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2010. – № 6. – С. 68-74.
32. Казанский Ю.П. Меловые и палеогеновые осадочные формации Среднего Приобья. (Западно-Сибирская низменность) / Ю.П. Казанский –Новосибирск, изд-во сиб. отд-ния АН СССР, 1963. – 354с.
33. Карлсон В.Л. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия листа О-45-XXXI / В.Л. Карлсон, Т.Я. Емельянова, Н.А. Ермашова. Томск, 1975.
34. Карлсон Н.А. Региональная оценка эксплуатационных запасов подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна. Томская область. (Отчет Региональной партии за 1973-1980 гг.), г. Томск, 1980
35. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора (Томская область). Томск, СО РАН, Диссертация на соискание ученой степени кандидата геологоминералогических наук, 2003.
36. Конторович В. А. и др. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое. – 2001.
37. Крайнов С.Р. Геохимия подземных вод: Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. – М.: Наука, 2004. – 677 с.

38. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное; Отв. ред. Академик Лаверов Н.П.. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012
39. Крайнов С. Р., Швец В. М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. – Недра, 1987.
40. Кривенцов А.В. Легенда Обской подсерии Западно-Сибирской серии листов Госгеолкарты-200. Томск, 2000
41. Кузеванов К.К., Дутова Е.М., Кузеванов К.И. Изменение гидрогеохимических условий Академического месторождения при эксплуатации (Томская область, г. Томск) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2022. – Т. 333. – №. 6. – С. 66-75.
42. Кузеванов К.И., Дутова Е.М., Покровский Д.С. Использование геоинформационных технологий при исследовании процессов техногенного подтопления урбанизированных территорий (на примере г. Томска) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2004. – Т. 307. – №. 7. – С. 30-35.
43. Кузеванов К.И. Исследование техногенных изменений гидрогеологических условий г. Томска: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук: Спец. 04.00.06 / К. И. Кузеванов; Томский политехнический университет. – Томск : Б.и., 1998. – 20 с.
44. Кулаков В.В. Водоподготовка питьевых вод в водоносном горизонте на тунгусском водозаборе некондиционных подземных вод в Хабаровске // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2016. – № 2. – С. 87-97.
45. Куренной В.В. Характеристика химического состава питьевых подземных вод территории Российской Федерации и разработка критериев его прогнозирования, ФГУП «ВСЕГИНГЕО», Москва, 2012.
46. Куренной В.В. Создание гидрогеологической карты РФ масштаба 1:2 500 000, ФГУП «ВСЕГИНГЕО», Москва, 2008.
47. Лехов В.А., Поздняков С.П., Бакшевская В.А. Экспериментальное изучение и численное моделирование влияния диффузии на миграцию загрязнения в

неоднородных песчано-глинистых отложениях. // Инженерная геология. – 2017. – № 5. – С. 60-71.

48. Лехов А.В., Шваров Ю. В. Рост минерализации эксплуатируемых подземных вод при наличии пирита в покровных отложениях //Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2002. – №. 4. – С. 316-325.

49. Лукнер Л., Шестаков В. М. Моделирование геофильтрации. – Недра, 1976.

50. Льготин В. А., Макушин Ю. В., Савичев О. Г. Проблемы рационального использования, восстановления и охраны водных объектов Томской области //Проблемы геологии и географии Сибири. – 2003. – С. 140-142.

51. Льготин В. А., Савичев О. Г., Макушин Ю. В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области //Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2010. – №. 1. – С. 23-29.

52. Льготин В. А. и др. Многолетняя изменчивость химического состава подземных вод Томской области //География и природные ресурсы. – 2012. – №. 1. – С. 74-79.

53. Макушин Ю. В. и др. Создание электронной версии карты четвертичных отложений Томской области масштаба 1: 500 000 //Геоинформатика-2000. – 2000. – С. 142-144.

54. Назаров А.Д.. Нефтегазовая гидрогеохимия юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Москва: Идея-Пресс, 2004. 286 с.

55. Назаров А.Д. Региональная гидрогеолого-стратификационная схема Юго-Восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ). 2003. т. 306, № 1. с. 42-49.

56. Назаров А.Д. Родники г. Томска – распространение, состав, возможности использования и аквапаркового обустройства (краткие сведения по исторической части города) / А.Д. Назаров // Известия ТПУ, Т. 305, вып.8, 2002 – С.236-256

57. Наливайко Н.Г. Микрофлора подземных вод города Томска как индикатор их экологического состояния: автореферат диссертации на соискание ученой степени

- кандидата геолого-минералогических наук: Спец. 04.00.06 / Н. Г. Наливайко; Томский политехнический университет. – Томск, 2000. – 20 с.
58. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.
59. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975.
60. Перельман А.И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982. 72 с.
61. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М.: Недра, 1968. 332 с.
62. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1979. 423 с.
63. Пиннекер Е.В. Ведущие факторы, процессы и обстановки формирования состава подземных вод // Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия. Новосибирск: Наука, 1982. с. 53-85.
64. Питьева К.Е. Гидрогеохимия, М.: Изд-во МГУ, 1978. 321 с.
65. Питьева К.Е. Основы региональной геохимии подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1969.
66. Плевако Г.Л., Шнайдер Л.А. Региональная оценка прогнозных ресурсов подземных вод восточных районов Томской области. Отчет регионального отряда по работам за 1984-1989 гг., г. Томск, 1989 г.
67. Покровский Д.С., Дутова Е.М. Балобаненко А.А., Покровский В.Д., Рехтин А.Ф. Гидрогеоэкологические условия водоснабжения населения юга Сибирского региона // Вестник Томского государственного университета. – 2014. – № 384. – С. 189–197.
68. Покровский Д.С. Минеральные новообразования водозабора Томского Академгородка / Д.С.Покровский, Е.М.Дутова, И.В.Вологодина // Минералогия техногенеза–2000. Миасс: ИМин УрО РАН, 2000. с. 172–175.
69. Покровский Д.С., Дутова Е.М., Кузеванов К.И. Применение геоинформационных технологий для оценки гидрогеоэкологических условий застраиваемых территорий // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – №. 3. – С. 107-112.
70. Покровский Д. С. и др. Природно-техногенное минералообразование на фильтрах обезжелезивания водозабора Томского Академгородка // Известия

Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2002. – Т. 305. – №. 6. – С. 319-329.

71. Покровский Д.С. Изучение процессов минералообразования на водозаборах Томской области / Д.С. Покровский, Е.М. Дутова, И.В. Вологодина // Водоснабжение и водоотведение: качество и эффективность: тр. III междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: СибГИУ, ЗАО «ЭкспоСибирь», 2000. с. 69–70.

72. Покровский Д.С. Минеральные новообразования на водозаборах Томской области / Д.С. Покровский, Е.М. Дутова, Г.М. Рогов и др. Томск: Изд-во НТЛ, 2002. 176 с.

73. Покровский, Д.С. Состав минеральных новообразований на водозаборах из подземных источников Томской области [Текст] / Д.С. Покровский, Е.М. Дутова, Г.М. Рогов, И.В. Вологодина // Труды Томских ученых по системам водоснабжения. Томск: Изд-ий дом «Цхай и Ко», 2005. с. 476–482.

74. Поляков В.А., Дубинчук В.Т. Изотопно-гидрогеохимические исследования на полигоне «Томский», ООО «НТЦВСЕГИНГЕО», Зеленый, 2007.

75. Поляков В. А. и др. Изотопные исследования подземных вод на полигоне "Томский" //Разведка и охрана недр. – 2008. – №. 11. – С. 47-52.

76. Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия. Л.: Недра, 1975. 208 с.

77. Посохов Е.В. Формирование химического состава подземных вод. М.: Гидрометеиздат, 1969. 334с.

78. Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна / Сост.: И.М. Земскова, Ю.К. Смоленцев, М.П. Полканов и др. М.: Недра, 1991. 262 с.

79. Рихванов Л.П. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Ю.И. Сухих, Н.В. Барановская, В.Т. Волков, Н.Н. Волкова, В.В. Архангельская, О.А. Денисова, А.Ю. Шатилов, Е.П. Янкович. Томск, - 2006. – 216 с.

80. Савичев О. Г., Макушин Ю. В. Многолетние изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области //Известия

Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2004. – Т. 307. – №. 4. – С. 60-63.

81. Савичев О. Г., Попов В. К., Кузеванов К. И. Эксплуатация и мониторинг систем и сооружений природообустройства и водопользования. – 2014.

82. Самарцев В.Н., Поздняков С.П. Опыт калибровки геофильтрационной модели берегового водозабора путем совместного использования данных опытно-фильтрационных работ и результатов мониторинга в период эксплуатации. // Инженерная геология. – 2017. – № 3. – С. 36-43.

83. Смоленцев Ю.К. Особенности формирования подземных вод зоны гипергенеза Западно-Сибирской плиты / Ю.К.Смоленцев, В.С.Кусковский // Подземные воды юга Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1987. с. 4 -65.

84. Степанова Т.Л. Оценка обеспеченности населения Томской области ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения: отчет. ОАО «Томскнефтегазгеология» ВНК, Филиал Томская геологоразведочная экспедиция. Томск, 2000.

85. Ю.П .Туров, И.Д. Пирогова, М.Ю. Гузньева, Н.А. Ермашова Органические примеси в природных водах в районе г. Стрежевого. // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25. – № 4. – С. 455-461.

86. Усова Н.Т., Лукашевич О.Д., Герб Л.В., Гончаров О.Ю. Утилизация отходов водоподготовки станций обезжелезивания. // Водоочистка. – 2012. – № 2. – С. 33-40.

87. Флешер А.В. Водно-гелиевые исследования в пределах полигона «Томский», ООО «ЛЭП», Чита, 2007.

88. Черняев Е.В., Колмакова О.В. «Геолого-геофизическое доизучение территории полигона «Томский», ООО «ГРК «ГЕОСФЕРА», Томск, 2007.

89. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. Изд. 2-ое, исправленное и переработанное. М.: Недра, 1998.431 с.

90. Шварцев, С. Л. Общая гидрогеология : Учебник для вузов / С. Л. Шварцев. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Издательство Альянс, 2012. – 601 с.

91. Шестаков В. М. Динамика подземных вод: учебник. – 1979.
92. Шинкаренко В.П. Наливайко Н.Г. Заключение о результатах микробиологического анализа подземных вод на водозаборе № 1 г. МП Северскводоканала// -Томск.
93. Шинкаренко В.П. Выявление и оценка очагов загрязнения подземных вод на территории Томской области. Отчет по работам за 1988-1993 гг. Томск, 1994.
94. Штенгелов Р. С. и др. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ //М: Изд-во Московского ун-та. – 1994.
95. Язиков Е.Г., Рихванов Л.П., Таловская А.В. Радиогеохимические исследования на территории полигона «Томский», ГОУВПО «ТПУ», Томск, 2007.
96. Язиков Е.Г., Изучение радиэкологической обстановки на территории Томской агропромышленной агломерации (ТАПА) и лабораторное исследование подземных вод и почв, МПП «Экогеос», Томск, 2002.
97. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды на территории Томской области за 1996 г., №2, ОГУП ТЦ Томскгеомониторинг, 1997 г.
98. Информационно-аналитическая записка по изучению микрофлоры подземных вод и ее коррозионной активности. (Водозабор № 1), МУП «Северский водоканал», 2001 г.
99. Информационный бюллетень. Состояние геологической среды (недр) на территории Томской области в 2001 г., №6, ОГУП ТЦ Томскгеомониторинг, 2002 г.
100. Appelo C.A.J., Drijver B., Hekkenberg R., Jonge M. de. Modeling in situ iron removal from ground water. // Ground water. – 1999. – Vol. 37, – № 6. – P. 811–817.
101. S. H. Bricker, V. J. Banks, G. Galik, D. Tapete, R. Jones Accounting for groundwater in future city visions // Land Use Policy. – 2017. – V. 69. – P. 618-630.
102. Khushboo Chaudhary, Pankaj Kumar Saraswat, Suphiya Khan. Improvement in fluoride remediation technology using GIS based mapping of fluoride contaminated groundwater and microbe assisted phytoremediation // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2019. – V. 168. – P. 164-176.

103. Péter Dobosy, Cseperke Éva Vizsolyi, Imre Varga, József Varga, Gyöző Láng, Gyula Záray. Comparative study of ferrate and thermally activated persulfate treatments for removal of mono- and dichlorobenzenes from groundwater // *Microchemical Journal*. – 2018. – V. 136. – P. 61-66.
104. Dutova E., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V., Vologdina I., Pokrovsky D. Hydrogenous mineral neof ormations in Tomsk water intake facility from underground sources. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016.
105. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai–Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 120. – P. 189–197.
106. Geochemical groundwater peculiarities of Paleogene sediments in S-E Western Siberia artesian basin / A.A. Balobanenko, V.A. L'gotin, E.M. Dutova, D.S. Pokrovskiy, A.N. Nikitenkov, I.V. Raduk // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 11, October 2016. – V. 43. – Iss. 1. – Article number 012030.
107. Sudipta Ghosh (Nath), Anupam Debsarkar, Amit Dutta Technology alternatives for decontamination of arsenic-rich groundwater — A critical review // *Environmental Technology & Innovation*. – 2019. – V. 13. – P. 277-303.
108. P. Jamin, S. Brouyère Monitoring transient groundwater fluxes using the Finite Volume Point Dilution Method // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2018. – V. 218. – P. 10-18.
109. Karmalov A.I., Dutova E.M., Vologdina I.V., Pokrovsky D.S., Pokrovskiy V.D., Kuzevanov K.K. Hydrogeochemical characteristics of water intakes from groundwater sources in Seversk. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016.
110. Kazak E., Pozdniakov S., Muromec N. Field study and iron reactive simulation in riverbank water supply well fields // *IAHS-AISH Publication Ser. «GQ10: Groundwater Quality Management in a Rapidly Changing World»*. – 2011. – P. 419–422.
111. M. I. McLean, L. Evers, A. W. Bowman, M. Bonte, W. R. Jones Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: A comparison of spatial and spatiotemporal methods *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 652. – P. 1339-1346.

112. Mi Lin, Asim Biswas, Elena M. Bennett. Identifying hotspots and representative monitoring area of groundwater changes with time stability analysis // *Cience of The Total Environment*. – 2019. – V. 667. – P. 419-426.
113. Millero F.J., Sotolongo S., Izaguirre M. The oxidation kinetics of Fe(II) in seawater // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. – 1986. – V. 51. – P. 793–801.
114. Miroslav Černík, Jaroslav Nosek, Jan Filip, Jaroslav Hrabal, Daniel W. Elliott, Radek Zbořil. Electric-field enhanced reactivity and migration of iron nanoparticles with implications for groundwater treatment technologies: Proof of concept // *Water Research*. – 2019. – V. 154. – P. 361-369.
115. Muhammad Tousif Bhatti, Arif A.Anwar, Muhammad Aslam. Groundwater monitoring and management: Status and options in Pakistan // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2017. – V. 135. – P. 143-153.
116. Paufler S., Grischek T., Feller J., Herlitzius J., Kulakov V.V. Manganese release linked to carbonate dissolution during the start-up phase of a subsurface iron removal well in Khabarovsk, Russia. // *The science of the total environment*. – 2019. – V. 650. – P. 1722-1733.
117. Gregory Poi, Esmaeil Shahsavari, Arturo Aburto-Medina, Puah Chum Mok, Andrew S. Ball. Large scale treatment of total petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using bioaugmentation // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – V. 214. – P. 157-163.
118. Sharma S.K., Petrusevski B., Schippers J.C. Biological iron removal from groundwater // *AQUA*. – 2005. – Vol. 54, – № 4. – P. 239–247.
119. Sung W., Morgan J.J. Kinetics and product of ferrous iron oxygenation in aqueous systems // *American Chem. Soc.* – 1980. – Vol. 14. – P. 561–568.
120. M. Tamer Ayvaz, Alper Elçi Identification of the optimum groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach // *Journal of Hydrology*. – 2018. – V. 563 – P. 1078-1091.
121. Wang, P., Pozdniakov, S.P., Shestakov, V.M .Optimum experimental design of a monitoring network for parameter identification at riverbank well fields // *Journal of Hydrology*. – 2015. – V. 523. – P. 531-541.

122. Wang P., Yu J., Liu C., Pozdniakov S.P., Grinevsky S.O. Shallow groundwater dynamics and its driving forces in extremely arid areas: a case study of the lower heihe river in northwestern CHINA. // Hydrological Processes. – 2014. – T. 28. – № 3. – С. 1539-1553.