

На правах рукописи



Янкович Елена Петровна

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА «ТОМСКИЙ»
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология (науки о Земле)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2017

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

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, профессор
Рихванов Леонид Петрович

Официальные оппоненты: **Грязнов Олег Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (г. Екатеринбург), Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии

Архипов Александр Леонидович, кандидат геолого-минералогических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск), доцент кафедры динамической геологии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (г. Барнаул)

Защита диссертации состоится 23 июня 2017 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/914/worklist>

Автореферат разослан 27 апреля 2017 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета Д 212.269.07
д.г.-м.н., профессор



С.И. Арбузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Широкие интегративные и функциональные возможности современных геоинформационных технологий в получении нового знания о пространственных и временных свойствах природных объектов предопределили их повсеместное применение для решения различных научно-исследовательских и прикладных задач. Велика востребованность технологий геоинформационных систем (ГИС) и при эколого-геохимической оценке территорий [Буренков, Гинзбург, 1997; Королев, 2007; Шитиков, 2003; Головин и др., 2004, 2012; Жуков и др., 1999; Богданов, 2005; Копылов и др., 2015; и др.]. В ходе эколого-геохимических исследований накапливается большой объем разнородной информации. ГИС как многофункциональный инструмент комплексной оценки природной среды, в том числе ее изменения, обусловленного техногенным воздействием, позволяет объединить эти данные на основе пространственной привязки к территории.

Наиболее ярко влияние техногенеза проявляется на территориях концентрирования многопрофильных предприятий [Геохимия ..., 1990; Экология Северного..., 1994; Рихванов, 1997; Языков, 2006; Трофимов и др., 2014; Алексеенко, 2000; Эколого-геохимические..., 2006 и др.]. Для промышленного юга Томской области характерна существенная техногенная нагрузка, обусловленная, во-первых, эксплуатацией предприятий ядерного топливного цикла с полигонами подземного захоронения и прудами-накопителями жидких радиоактивных отходов (ЖРО), которые загрязняют компоненты окружающей среды техногенными радионуклидами; во-вторых, функционированием промышленных предприятий и автотранспорта, загрязняющих атмосферу и почвы отходами производства; в-третьих, вторичным загрязнением приземной атмосферы вследствие ветрового переноса загрязняющих веществ с почвы, а также возможностью поступления в подземные воды загрязняющих веществ в результате фильтрации их с поверхности и со стороны полигонов ЖРО [Рихванов, 1997; Эколого-геохимические..., 2006; Попов и др., 2003, и др.]. Поэтому вопрос всесторонней экологической оценки современного состояния компонентов природной среды в районе г. Томска и прилегающей территории особенно актуален.

Для адекватного и качественного исследования состояния геологической среды при разнообразных видах техногенного воздействия и определения рационального комплекса необходимых показателей, позволяющих эффективно решать практические задачи прогноза, на территории Обь-Томского междуречья и прилегающем правом берегу р. Томи по инициативе ТЦ «Томскгеомониторинг» (ныне АО «Томскгеомониторинг») в 2001 г. был организован гидрогеоэкологический полигон «Томский» (полигон «Томский») [Программа..., 2001; Сводный отчет..., 2011]. Создание полигона «Томский» явилось важным методическим этапом в изучении эколого-геохимических характеристик территории, который позволил аккумулировать имеющиеся к этому времени многолетние ряды систематических наблюдений за подземными водами, почвами,

снегом и перейти к комплексным, обобщающим исследованиям. Одним из таких исследований и является настоящая диссертационная работа.

В представленной работе решаются актуальные задачи использования геоинформационных технологий для обработки результатов эколого-геохимических исследований компонентов природной среды гидрогеоэкологического полигона «Томский».

Цель работы – выполнить эколого-геохимическую оценку компонентов природной среды гидрогеоэкологического полигона «Томский» с использованием геоинформационных технологий.

Объект исследований. Компоненты природной среды (почва, снег, подземные воды) территории гидрогеоэкологического полигона «Томский».

Предмет исследований. Геохимические показатели компонентов природной среды.

Задачи исследования:

1. Разработать геоинформационную систему «Гидрогеоэкологический полигон Томский» (ГИС «ГГЭП Томский») для хранения, обработки и представления эколого-геохимической информации.
2. Построить комплект карт по степени геохимической трансформации почв, снегового покрова с использованием созданной ГИС «ГГЭП Томский».
3. Провести анализ гидрогеохимических данных с выделением однородных гидрогеохимических совокупностей, используя функционал ГИС, для чего создать программу для выделения однородных гидрогеохимических совокупностей на основе теории взаимодействия системы вода–порода, интегрированную в ГИС «ГГЭП Томский».
4. Определить базовые параметры показателей качества подземных вод изучаемой территории.
5. Оценить эколого-геохимическое состояние подземных вод относительно базовых данных.

Методологическая основа. В работе использованы теоретические разработки отечественных и зарубежных авторов по геоэкологии, геоинформационным системам, моделированию (В.А. Алексеенко, А.И. Перельман, Ю.Е. Саэт, Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, В.К. Попов, В.С. Тикунов, М. Зейлер, Э. Митчелл, М.Н. ДеМерс, Р. Томлинсон и др.) и эволюционному развитию системы вода–порода (Р.М. Гаррелс, Ч.Л. Крайст, С.Л. Шварцев, С.Р. Крайнов, Б.П. Рыженко, В.П. Зверев, Г.Б. Наумов, М.Б. Букаты, Ю.Г. Копылова, Е.М. Дутова и др.).

Методическая база представлена теорией геоинформационных систем, методами химической термодинамики, геоэкологии и геохимии, математической статистики. Программное обеспечение: ArcGIS, Statistica.

Фактический материал. База геоданных сформирована на основе обширного фактического материала, полученного в ходе комплексных эколого-геохимических исследований изучаемой территории сотрудниками АО «Томскгеомониторинг», учеными ТПУ, ТГУ, ТГАСУ и других организаций. В работе использованы материалы, полученные в ходе комплексных

исследований, проведенных сотрудниками и студентами кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ (зав. каф. Л.П. Рихванов), в которых автор диссертации принимал непосредственное участие, фондовые материалы (ОА «Томскгеомониторинг», генеральный директор В.А. Лыготин) и опубликованные источники. В рамках хозяйственных работ (2009–2011 гг.) с ОА «Томскгеомониторинг» автором совместно с сотрудниками НОЦ «Вода» (начальник Ю.Г. Копылова), кафедры ГИГЭ (зав. каф. С.Л. Шварцев) ИПР ТПУ проводились исследования состояния подземных вод территории гидрогеоэкологического полигона «Томский».

Личный вклад автора заключался в сборе, систематизации и анализе эколого-геохимических данных исследуемой территории, создании программы для выделения однородных гидрогеохимических совокупностей, построении карт, участии в проведении полевых исследований, в составлении научно-исследовательских отчетов, в создании базы геоданных и построении геоинформационной системы.

Научная новизна:

- Впервые создана геоинформационная система «ГГЭП Томский», реализованная в среде ArcGIS, включающая базу результатов геохимического опробования компонентов природной среды, системные и авторские инструменты для обработки данных.
- На основании анализа карт, построенных с использованием созданной базы геохимических данных, установлены участки техногенной трансформации компонентов природной среды.
- Предложены новые методики оценки эколого-геохимического состояния подземных вод на основе геоинформационных технологий. (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662947 РФ, Е.П. Янкович, 07.12.2015 г., дата публикации 20.01.2016 г.)
- Получены новые данные о распространенности базовых концентраций химических элементов в подземных водах с учетом их геохимических типов.
- Выявлена природно-техногенная составляющая повышенных содержаний химических элементов в подземных водах.

Защищаемые положения:

1. Геоинформационная система «Гидрогеоэкологический полигон Томский», реализованная в среде ArcGIS, является эффективным инструментом комплексной эколого-геохимической оценки природной среды, позволяющим получать модели пространственной локализации химических элементов в почве, снеге, подземных водах и картографировать эколого-геохимическую обстановку.
2. Разработанная геоинформационная технология выделения однородных гидрогеохимических совокупностей в водоносных комплексах с учетом взаимодействия системы вода–порода позволяет получить базовые параметры распределения химических элементов в подземной гидросфере (подземных водах).

3. Коэффициенты контрастности, определенные относительно базовых параметров, позволяют обнаруживать формирующиеся геохимические аномалии в подземных водах и идентифицировать избыточное поступление химических элементов преимущественно техногенного происхождения.

Практическая значимость определяется возможностью использования базы геохимических данных, карт фоновых значений при комплексной эколого-геохимической оценке природной среды и прогнозировании последствий антропогенного воздействия. Материалы исследований были использованы в процессе выполнения хоздоговорных работ и грантов. Внедрение новой технологии обработки гидрогеохимических данных на основе анализа геохимических типов вод с использованием геоинформационных технологий способствует совершенствованию мониторинга качества вод и может использоваться при оценке эколого-геохимического состояния водной среды и при прогнозе её изменения в условиях техногенного стресса. Результаты исследований по гидрогеоэкологическому полигону «Томский» переданы АО «Томскгеомониторинг» и представлены в сводном информационном отчете о состоянии недр на территории Томской области. Предложенная методика выявления природно-техногенных повышенных содержаний химических элементов в подземных водах может быть применена при ведении государственного мониторинга подземных вод.

Материалы диссертационной работы используются в учебных курсах «Геоинформационные системы», «Исследование водохозяйственных систем природно-техногенных комплексов», «Геохимический мониторинг», читаемых студентам Института природных ресурсов ТПУ.

Достоверность защищаемых положений определяется большим массивом фактического материала, современными методами обработки данных с использованием специализированного программного обеспечения. Результаты исследований получены на современном сертифицируемом аналитическом оборудовании с использованием как передовых, так и традиционных методов исследования в аналитических центрах: НОЦ «Вода» ИПР ТПУ (г. Томск), Лаборатория ядерно-геохимических методов исследования кафедры геоэкологии и геохимии ИПР ТПУ, Гидрохимическая лаборатория АО «Томскгеомониторинг».

Апробация работы и публикации. Результаты исследований и основные положения докладывались на международных и всероссийских конференциях: Международный научный конгресс «ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2005, 2011, 2012), VIII научная конференция по тематической картографии (Иркутск, 2006), International Symposium on Trace Elements in the Food Chain Deficiency or Excess of Trace Elements in the Environment as a Risk of Health (Будапешт, Венгрия, 2006, 2009), 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012) (Томск, 2012), Всероссийское совещание по подземным водам востока России (Иркутск, 2012), International Multidisciplinary Scientific Geoconference (Албена, Болгария, 2014, 2015) и др. По теме диссертации в части проведения эколого-геохимических и геологических исследований с использованием геоинформационных технологий опубликовано 30 работ, в том числе 8 статей в журналах из списка ВАК, 5 статей,

в изданиях индексируемых в реферативной базе данных Scopus, 4 монографии, патент, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Материалы диссертации изложены на 136 стр., включают 53 рисунка, 12 таблиц. Список литературы содержит 212 наименований.

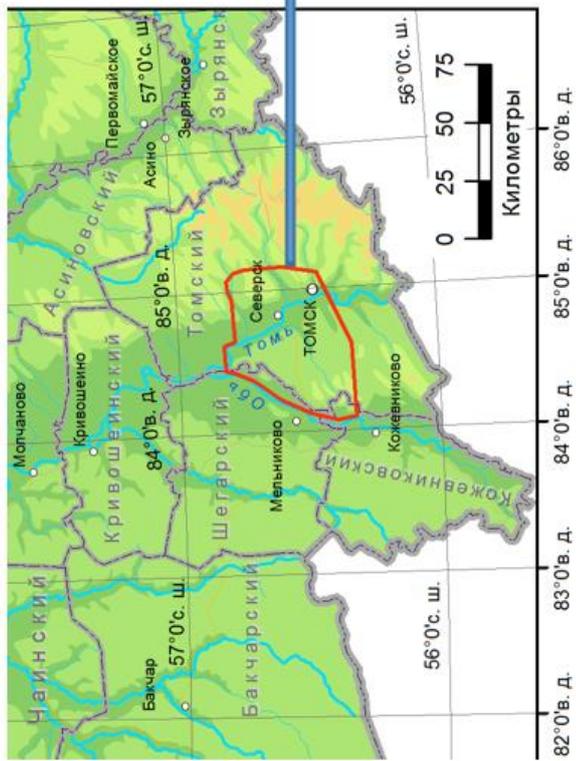
Благодарности. Автор глубоко признателен научному руководителю д.г.-м.н., профессору Л.П. Рихванову. Автор искренне благодарит генерального директора АО «Томскгеомониторинг» к.г.-м.н. В.А. Лыготину за возможность использования данных и поддержку, сотрудников АО «Томскгеомониторинг» Г.А. Жульминой, В.П. Шинкаренко, Н.В. Винниченко, Д.Н. Четвергову за совместную работу и советы. За внимание, советы и объективную критику автор благодарен д.-рам г.-м.н., профессорам В.К. Попову, С.Л. Шварцеву, Е.Г. Языкову, Е.М. Дутовой, О.Г. Савичеву; к.г.-м.н. Н.В. Гусевой, к.х.н. Н.А. Осиповой. Особую признательность и благодарность автор выражает к.г.-м.н. Ю.Г. Копыловой и к.г.-м.н. Ю.В. Макушину, которые определили основную направленность научных исследований и оказывали поддержку на протяжении всего периода выполнения диссертационной работы. Автор благодарен коллективам кафедр ГЭГХ, ГРПИ и своей семье.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. *Геоинформационная система «Гидрогеоэкологический полигон Томский», реализованная в среде ArcGIS, является эффективным инструментом комплексной эколого-геохимической оценки природной среды, позволяющим получать модели пространственной локализации химических элементов в почве, снеге, подземных водах и картографировать эколого-геохимическую обстановку.*

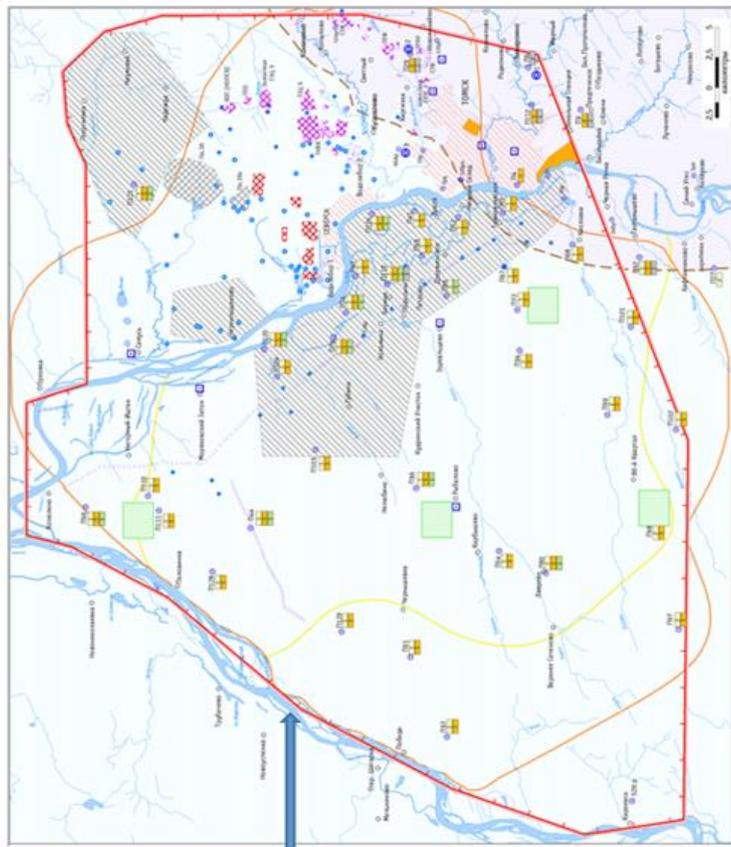
Гидрогеоэкологический полигон «Томский» (полигон «Томский») расположен в юго-юго-восточной части Томской области, на Обь-Томском междуречье и прилегающем правом берегу р. Томи (рисунок 1). В административном плане границы полигона включают Томский район, на западе – незначительную часть Шегарского и Кожевниковского районов Томской области. В границах района исследований расположены города Томск, Северск и ряд малых населенных пунктов с общим количеством жителей более 700 тыс. человек. Плотность населения составляет около 7,2 человека на квадратный километр.

Особая природно-техногенная система гидрогеоэкологического полигона «Томский» характеризуется депрессионным, репрессионным и комплексным характером воздействия техногенеза. Депрессионное воздействие оказывает многолетняя эксплуатация Томского и Северских водозаборов вследствие отбора большого объема воды. Репрессионное воздействие вызвано нагнетанием жидких радиоактивных отходов (ЖРО) Сибирского химического комбината (СХК) в подземную гидросферу. Комплексное воздействие оказывают и другие виды хозяйственной деятельности (предприятия ядерно-топливного цикла, нефтехимические, машиностроительные, электротехнические,



Условные обозначения

- Контур полигона
- Гидрогеологические структуры I порядка**
 - Западно-Сибирский артезианский бассейн
 - Саяно-Алтайская гидрогеологическая складчатая область
 - Граница между гидрогеологическими структурами
- Наблюдательная сеть за подземными водами**
 - Государственная опорная: п97
 - пост скважин
 - возраст наблюдемого горизонта – цвет ядра: желтый – четвертичный, оранжевый – палеогеновый, зеленый – неогеновый, серый – палеозойский; цифра внутри знака – количество скважин
 - одиночные скважины и их номера
- Ведомственная**
 - Объектная
- Наблюдательная сеть за ЭГП**
 - участки активного развития оползней



Водозаборы подземных вод

- Эксплуатирующие утвержденные запасы подземных вод
- Томский**
- Северский**
 - 1 – Академический
 - 2 – Межениновской ПФ
 - 3 – ГУЗ Том.обл. клинической психиатрической больницы
- Эксплуатирующие неутвержденные запасы подземных вод

Прочие обозначения

- Промышленные площадки
- Сибирского химического комбината
- Северной промзоны
- Полигоны глубинного захоронения ЖРАО
- Участки
- проведения эколого-геохимических исследований
- ландшафтно-экологических исследований

Депрессионные воронки

- неоген-четвертичного комплекса
- палеогенового комплекса

Рисунок 1 – Обзорная схема района исследований

приборостроительные, фармацевтические, сельскохозяйственные) с учетом влияния двух предыдущих факторов [Сводный отчет..., 2011; Эколого-геохимические..., 2006, и др.].

На территории полигона «Томский» проведены многочисленные эколого-геохимические исследования почв, снега, подземных и поверхностных вод (ОА «Томскгеомониторинг», Л.П. Рихванов, Е.Г. Языков, В.К. Попов, А.М. Адам, С.Л. Шварцев, О.Г. Савичев, и др.). Накоплен большой объем разнородных и разрозненных данных, характеризующих состояние природной среды изучаемой территории.

Для объединения и совместной обработки таких данных нами разработана и создана геоинформационная система «Гидрогеоэкологический полигон Томский». ГИС «ГГЭП Томский», реализованная в среде ArcGIS, включает базу геоданных, системные и авторские инструменты для пространственного анализа эколого-геохимических данных (рисунок 2).

Базовые пространственные данные составлены на основе результатов работ по созданию Государственных геологических карт масштаба 1:200000 (Листы О-45-XXXI, О-45-XXXII, О-45-XXV, О-45-XXVI) и включают наборы классов объектов топографической, геологической и гидрогеологической основ. Состав классов пространственных объектов, структура атрибутивных таблиц соответствуют требованиям, предъявляемым к представлению в НРС ГБЦГИ цифровых моделей листов Государственной геологической карты Российской Федерации.

Данные по почвам (120 точек опробования, 48 показателей) и твердому осадку снега (90 точек опробования, 50 показателей), которые хранились в таблицах разного вида, в том числе и в бумажном, переведены в базу геоданных геоинформационной системы «ГГЭП Томский».

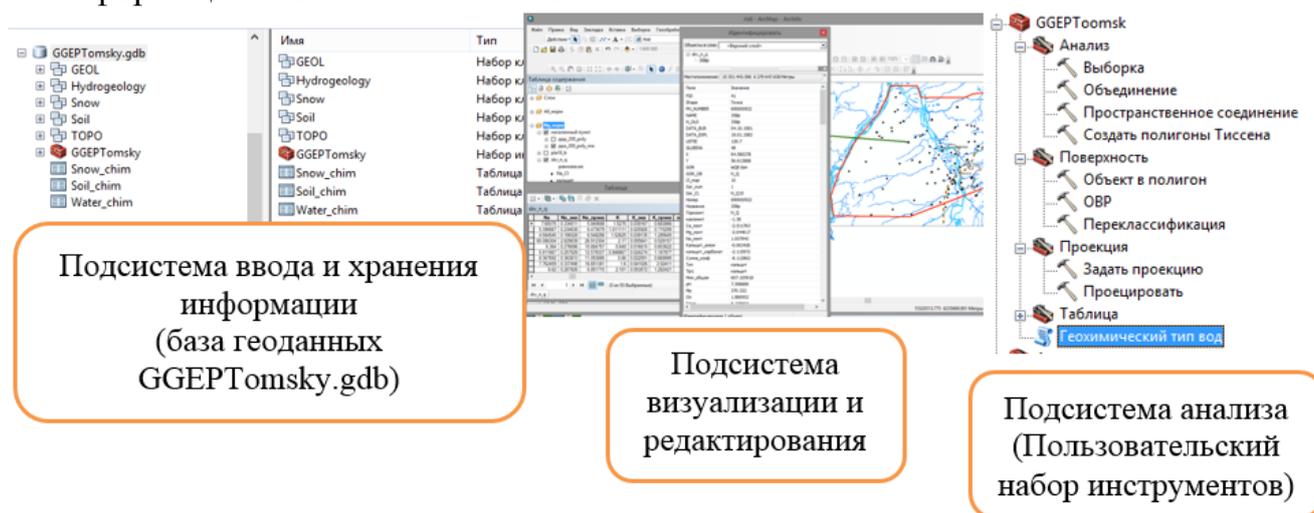


Рисунок 2 – Геоинформационная система «Гидрогеоэкологический полигон Томский»

Атрибутивная база данных по подземным водам гидрогеоэкологического полигона «Томский» сформирована на основе информационной аналитической системы (ИАС) (АО «Томскгеомониторинг»). Путем запроса было выбрано 1100 скважин, расположенных в пределах полигона «Томский», и сформированы

таблицы, включающие характеристики химического состава вод, координаты скважин, глубины, даты бурения, даты ввода в эксплуатацию, вскрытый водоносный горизонт и др. Таблица с результатами химического анализа (74 показателя) содержала более 15000 записей (период наблюдения 1962–2010 гг.). В базу геоданных ГИС «ГГЭП Томский» также включены справочные таблицы, содержащие информацию о методах химического анализа, величинах ПДК для компонентов вод хозяйственно-питьевого назначения, фоновых концентрациях химических веществ для в почв и твердого осадка снега.

Автоматизация выделения на изучаемой территории участков с различной экологической ситуацией базируется на геоинформационных технологиях и принятых методиках оценки уровня загрязнения компонентов [Методические рекомендации, 1982, 1988; Геохимия..., 1990; Эколого-геохимические..., 2006, и др.] (рисунок 3).

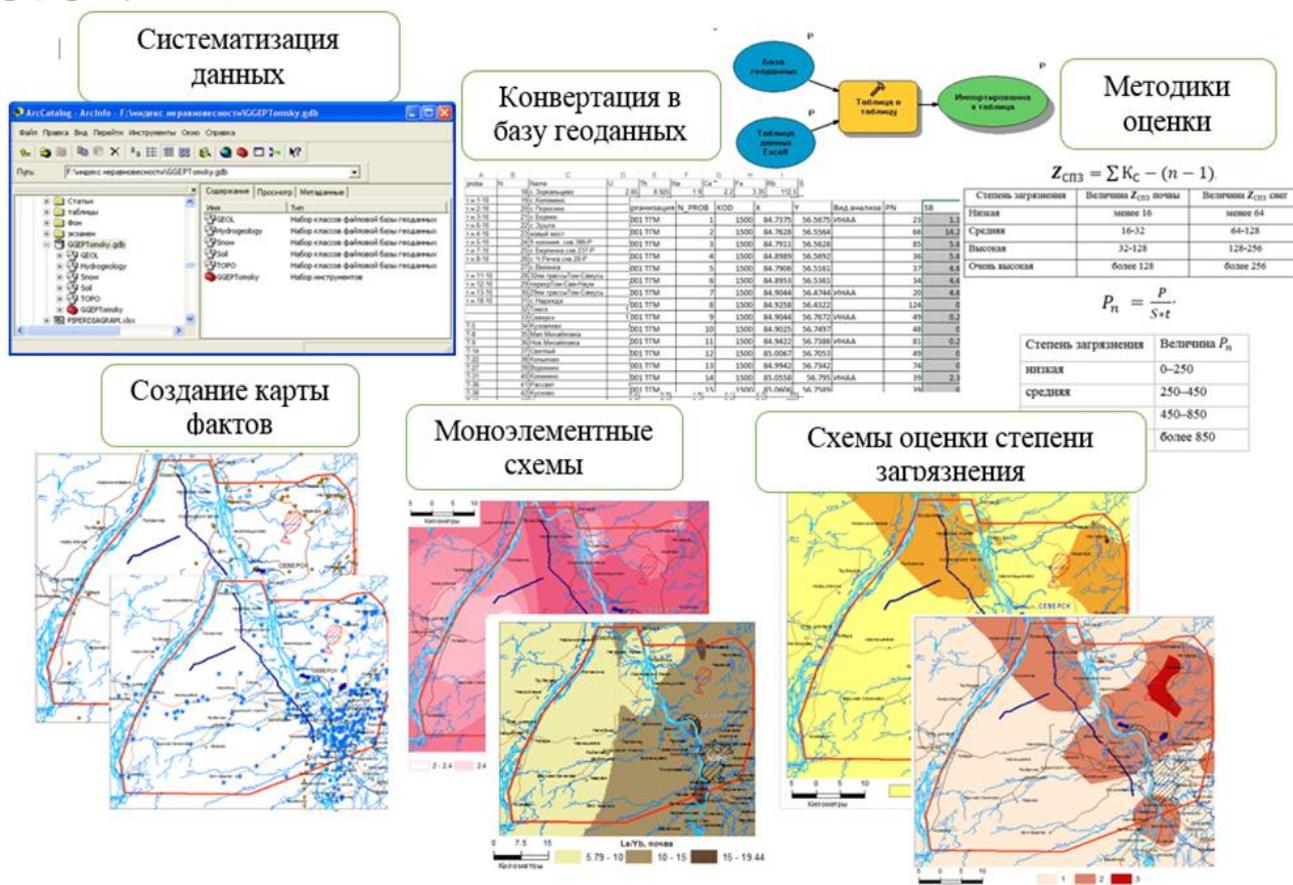
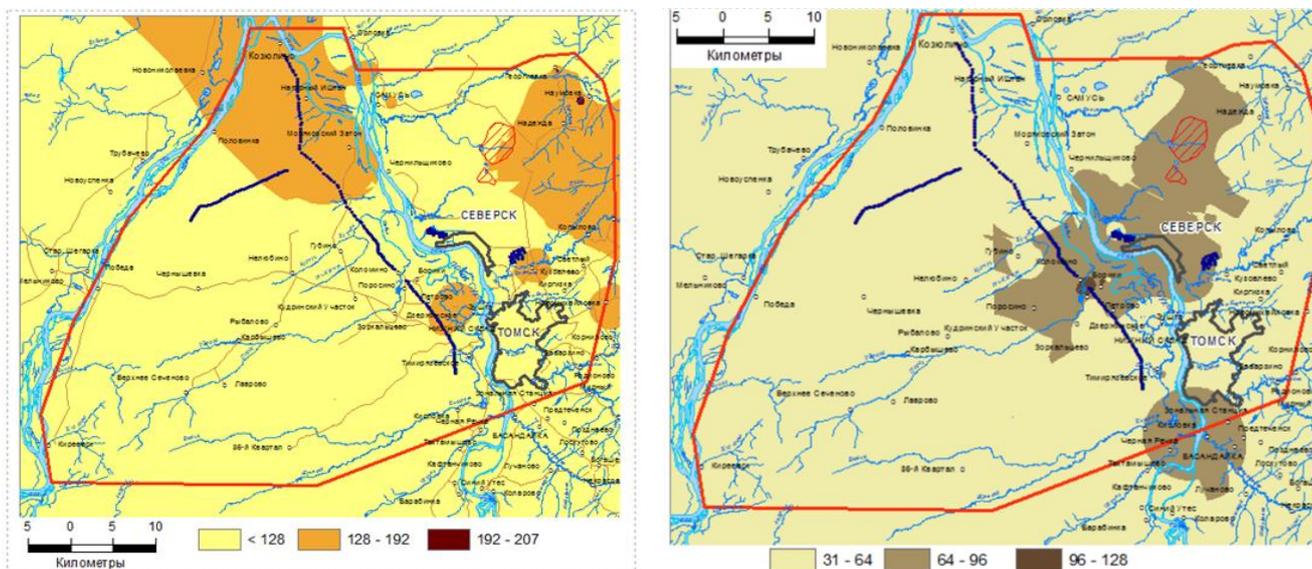


Рисунок 3 – Технология систематизации и анализа данных по почвам и снегу в геоинформационной системе «Гидрогеоэкологический полигон Томский»

Техногенная нагрузка на территорию полигона «Томский» связана с многопрофильной хозяйственной деятельностью, что приводит к образованию полиэлементных геохимических аномалий. Интенсивность таких аномалий характеризуется показателем суммарного загрязнения [Геохимия..., 1990]. При расчете суммарного показателя загрязнения ($Z_{СПЗ}$) для твердого осадка снега и почв, учитывались коэффициенты концентраций тяжелых, редких и редкоземельных металлов.

По величине суммарного показателя загрязнения пылеаэрозольных выпадений по данным изучения снеговых планшетов территория полигона «Томский» относится к территории со средней и высокой степенью загрязнения (рисунок 4, а). Максимальное загрязнение отмечается северо-восточнее СХК и северо-западнее его, на левом берегу р. Томи.



а) степень загрязнения по СПЗ твердого осадка б) степень загрязнения по СПЗ почв:
 снега: <128 – средняя; 128–207 – высокая 32–128 – высокая

Рисунок 4 – Схемы оценки степени аэрогенного загрязнения гидрогеоэкологического полигона «Томский»

По значениям суммарного показателя почв территория полигона «Томский» характеризуется высокой степенью загрязнения ($32 < \text{СПЗ} < 128$) и соответствует опасному уровню заболеваемости населения [Геохимия..., 1990]. На фоне общего высокого загрязнения выделяются два участка – один северо-восточного простирания, находящийся в непосредственной близости от СХК и второй на юго-востоке, пригород г. Томска (рисунок 4, б).

Оценка экологической ситуации территории по состоянию подземных вод, особенно в пределах водоносных горизонтов, служащих источниками водоснабжения, проводится с учетом влияния степени загрязнения подземных вод (гидрогеохимический фактор) и степени понижения уровней подземных вод в процессе работы водозабора (гидродинамический фактор) [Методические..., 1988; Леонтьева, 2014, и др.]. Оценка суммарной степени воздействия техногенных факторов (гидрогеохимического и гидродинамического) основана на балльной системе, предложенной Е.В. Леонтьевой (таблица 1). По величине суммарного влияния техногенных факторов на подземные воды принята следующая классификация экологического состояния территории: 2 – благоприятная, 3 – удовлетворительная, 4 – неблагоприятная, 5–6 – напряженная, 8 – сложная.

Для оценки экологического состояния подземных вод неоген-четвертичного водоносного комплекса с учетом влияния техногенных факторов территории полигона «Томский» использованы следующие характеристики: границы распространения депрессионной воронки (по данным АО «Томскгеомониторинг»),

мощность водоносного комплекса и содержание никеля в подземных водах наблюдательных скважин.

Таблица 1 – Суммарная оценка степени влияния техногенных факторов

Суммарная оценка степени влияния техногенных факторов			ГХФ ¹ . Степень загрязнения подземных вод		
			отсутствует до фоновых значений (1 балл)	слабовыраженное от фоновых значений до ПДК (2 балла)	интенсивное свыше ПДК (4 балла)
ГДФ ² . Степень снижения уровня подземных вод	отсутствует	до г.в.д. ³ (1 балл)	2	3	5
	слабовыраженное	от г.в.д. до 0,75*m ⁴ (2 балла)	3	4	6
	интенсивное	свыше 0,75*m (4 балла)	5	6	8

Примечание. ¹ГХФ – Гидрогеохимический фактор, ²ГДФ – Гидродинамический фактор, ³г.в.д. – границы воронки депрессии, ⁴ m – мощность водоносного комплекса.

По комплексному воздействию техногенных факторов на подземные воды неоген-четвертичных отложений в долине р. Томи, д. Губино, определен участок с напряженной обстановкой. На Обь-Томском междуречье выделена обширная площадь с неблагоприятной обстановкой, включающая все линии Томского водозабора подземных вод. На оставшейся части территории полигона «Томский» складывается удовлетворительная экологическая ситуация по состоянию подземных вод неоген-четвертичных отложений (рисунок 5).

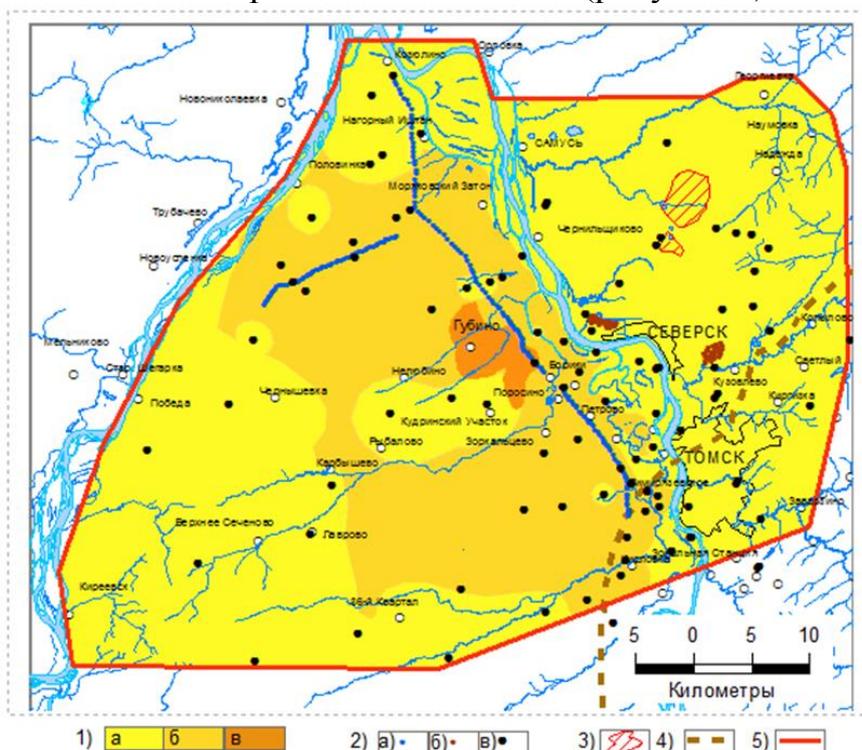


Рисунок 5 – Схема экологической ситуации по состоянию вод неоген-четвертичных отложений гидрогеоэкологического полигона «Томский»

Условные обозначения: 1) экологическая ситуация: а – удовлетворительная, б – неблагоприятная, в – напряженная; 2) эксплуатационные скважины водозаборов: а) Томского, б) Северских, в) наблюдательной скважины; 3) площадки ЖРО; 4) граница между ЗСАБ и САГСО; 5) контуры полигона «Томский»

Таким образом, геоинформационная система «ГГЭП Томский» представляет собой обобщенную геоинформационную модель полигона «Томский», базирующуюся на единой базе данных, в которой систематизированы и структурированы все данные об объектах, о топографической основе и единых методах обработки и представления данных. Инструменты, включенные в ГИС «ГГЭП Томский», позволяют в автоматическом режиме получать модели пространственной локализации химических элементов в почвах, снеге, подземных водах в абсолютных и относительных единицах, строить моно- и полиэлементные карты, проводить оценку в пространственном и временном аспектах. Это все повышает эффективность комплексной эколого-геохимической оценки природной среды гидрогеоэкологического полигона «Томский».

Второе защищаемое положение. *Разработанная геоинформационная технология выделения однородных гидрогеохимических совокупностей в водоносных комплексах с учетом взаимодействия системы вода–порода позволяет получить базовые параметры распределения химических элементов в подземной гидросфере (подземных водах).*

Выявление образующихся геохимических аномалий основано на базовых параметрах состояния природной среды. Существенную часть этой информации представляют характеристики геохимического фона природной среды (среднее значение и стандартное отклонение), которые должны быть положены в основу ее эколого-геохимической оценки [Сорокина и др., 2001]. Геохимический фон природной среды рассчитывается для внутренне однородных по условиям формирования природных объектов. Под однородной совокупностью нами понимается такая совокупность, элементы которой формируются под воздействием общих основных причин и условий [Родионов, 1968].

Обширный комплекс сведений, получаемых при гидрогеохимических исследованиях, необходимо систематизировать с целью выявления участков с аномальными содержаниями элементов. От правильности установления фоновых и аномальных содержаний элементов-индикаторов зависит надежность дальнейшей интерпретации гидрогеохимических данных. На фоновые значения элементов влияют химический состав воды, литолого-геохимические особенности водовмещающих пород, геохимический ландшафт и другие факторы. Поэтому, прежде чем проводить определение фоновых показателей, следует классифицировать подземные воды по условиям формирования.

Систематизировать гидрогеохимические данные по условиям формирования вод можно, используя стадийность развития системы вода–порода и выделяя однородные гидрогеохимические совокупности как геохимические типы вод. В основу методики выделения однородных гидрогеохимических совокупностей, реализованной средствами геоинформационных технологий, положены реакции взаимодействия воды с минералами, результаты химических анализов подземных вод и обоснование геохимических типов вод по С.Л. Шварцеву [Шварцев, 1998; Геологическая эволюция..., 2007, и др.].

Общая технология систематизации и анализа гидрогеохимических данных в геоинформационной системе «Гидрогеоэкологический полигон Томский» показана на рисунке 6.

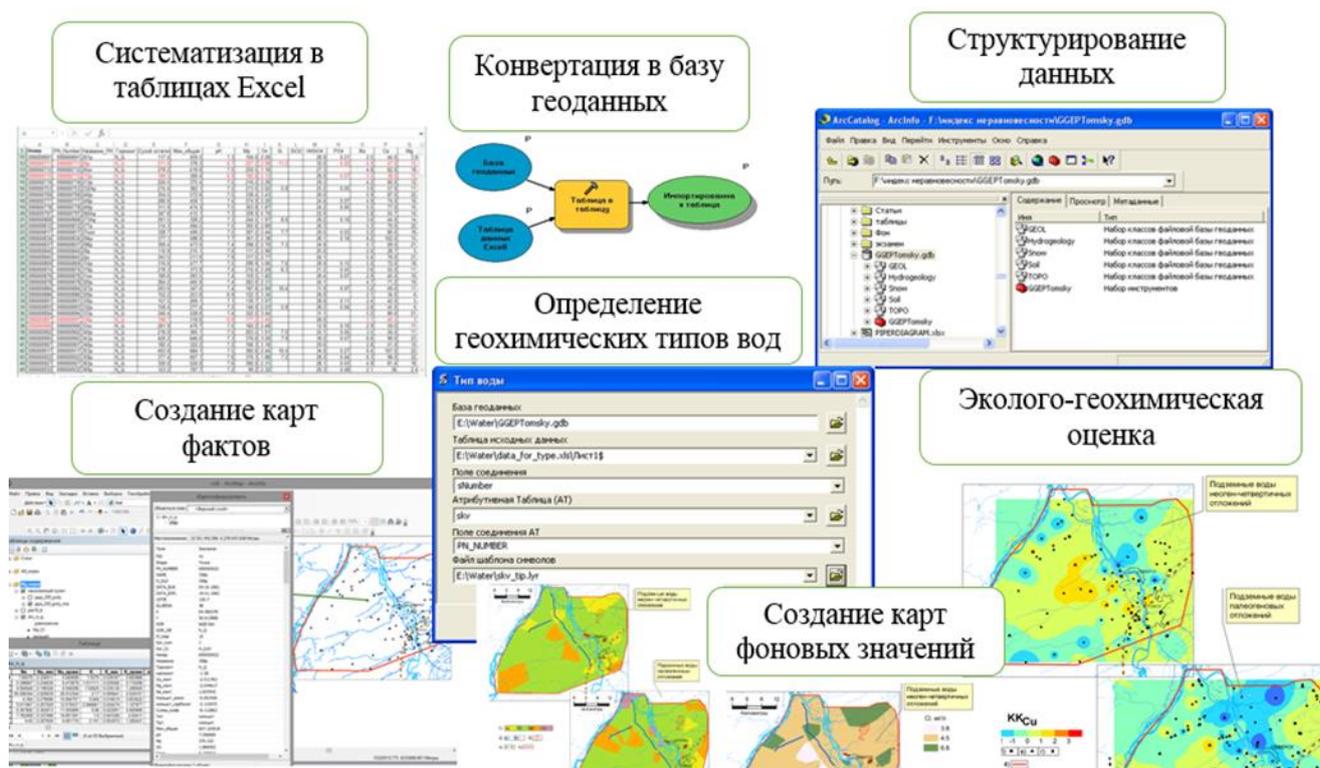


Рисунок 6 – Технология систематизации и анализа гидрогеохимических данных в геоинформационной системе «Гидрогеоэкологический полигон Томский»

Количественный метод оценки степени равновесности-неравновесности вод относительно того или иного минерала основывается на вычислении индекса неравновесности или показателя агрессивности А по В.П. Звереву [Зверев, 1982; Копылова и др., 2013, и др.].

Для автоматизации расчет индекса неравновесности, последующего анализа его значений и определения геохимических типов вод автором создана программа на языке программирования Python в среде ArcGIS [Свидетельство, 2016].

На основании анализа значений индекса неравновесности в каждой изучаемой скважине определен геохимический тип вод (в соответствии с классификацией С.Л. Шварцева) и сформированы однородные гидрогеохимические совокупности: алюминиево-кремнистых вод (воды, равновесные с каолинитом); кремнистых кальциево-магниевых вод (воды, равновесные с Са-Mg-монтмориллонитами); кремнистых карбонатно-кальциевых вод (воды, равновесные с кальцитом); кремнисто-натриевых вод (воды, равновесные с Na-монтмориллонитами) (таблица 2).

Построены схемы пространственного распространения геохимических типов вод в водоносных комплексах полигона «Томский» (рисунок 7).

Установлено, что в пределах одного водоносного комплекса на разных его участках наблюдается формирование разных геохимических типов вод,

обусловленных их временем взаимодействия в системе вода–порода и интенсивностью водообмена (рисунок 7, таблица 2).

Таблица 2 – Геохимические типы вод гидрогеоэкологического полигона «Томский»

Водовмещающие отложения (кол-во скважин)	Геохимический тип вод	Необходимое химическое условие равновесия с	Кол-во скважин	
			шт	%
Неоген-четвертичные (93)	алюминиево-кремнистый	каолинитом	15	16
	кремнистый кальциево-магниевый	Ca-Mg-монтмориллонитами	72	78
	кремнистый карбонатно-кальциевый	кальцитом	6	7
Палеогеновые (139)	алюминиево-кремнистый	каолинитом	4	3
	кремнистый кальциево-магниевый	Ca-Mg-монтмориллонитами	115	83
	кремнистый карбонатно-кальциевый	кальцитом	13	9
	кремнисто-натриевый	Na-монтмориллонитами	7	5
Меловые (42)	кремнистый кальциево-магниевый	Ca-Mg-монтмориллонитами	23	55
	кремнисто-натриевый	Na-монтмориллонитами	19	45
Палеозойские (67)	алюминиево-кремнистый	каолинитом	2	3
	кремнистый кальциево-магниевый	Ca-Mg-монтмориллонитами	42	63
	кремнистый карбонатно-кальциевый	кальцитом	22	33
	кремнисто-натриевый	Na-монтмориллонитами	1	1

Доминирующим типом во всех водоносных комплексах изучаемой территории является формирование кремнистых кальциево-магниевых вод, их доля от общего числа скважин изменяется от 55 % в водах меловых отложений до 83 % в водах палеогеновых отложений. Кремнисто-натриевые воды характерны для меловых отложений, их доля составляет 45 % от общего числа скважин этого комплекса. Доля алюминиево-кремнистых вод невелика, составляет 16% в водах неоген-четвертичных отложений.

Обработка данных в однородных гидрогеохимических совокупностях проводилась традиционными для геохимии статистическими методами. Параметры распределения химических элементов в подземных водах определялись с учетом закона распределения. При нормальном законе распределения оценивалось среднее арифметическое содержание химических элементов, оно бралось за фоновое содержание, и стандартное отклонение – допустимое колебание в пределах фоновой области. При соответствии логнормальному закону распределения оценивались среднее геометрическое содержание химических элементов и стандартный множитель. Все операции по статистической обработке данных проводились в программе Statistica.

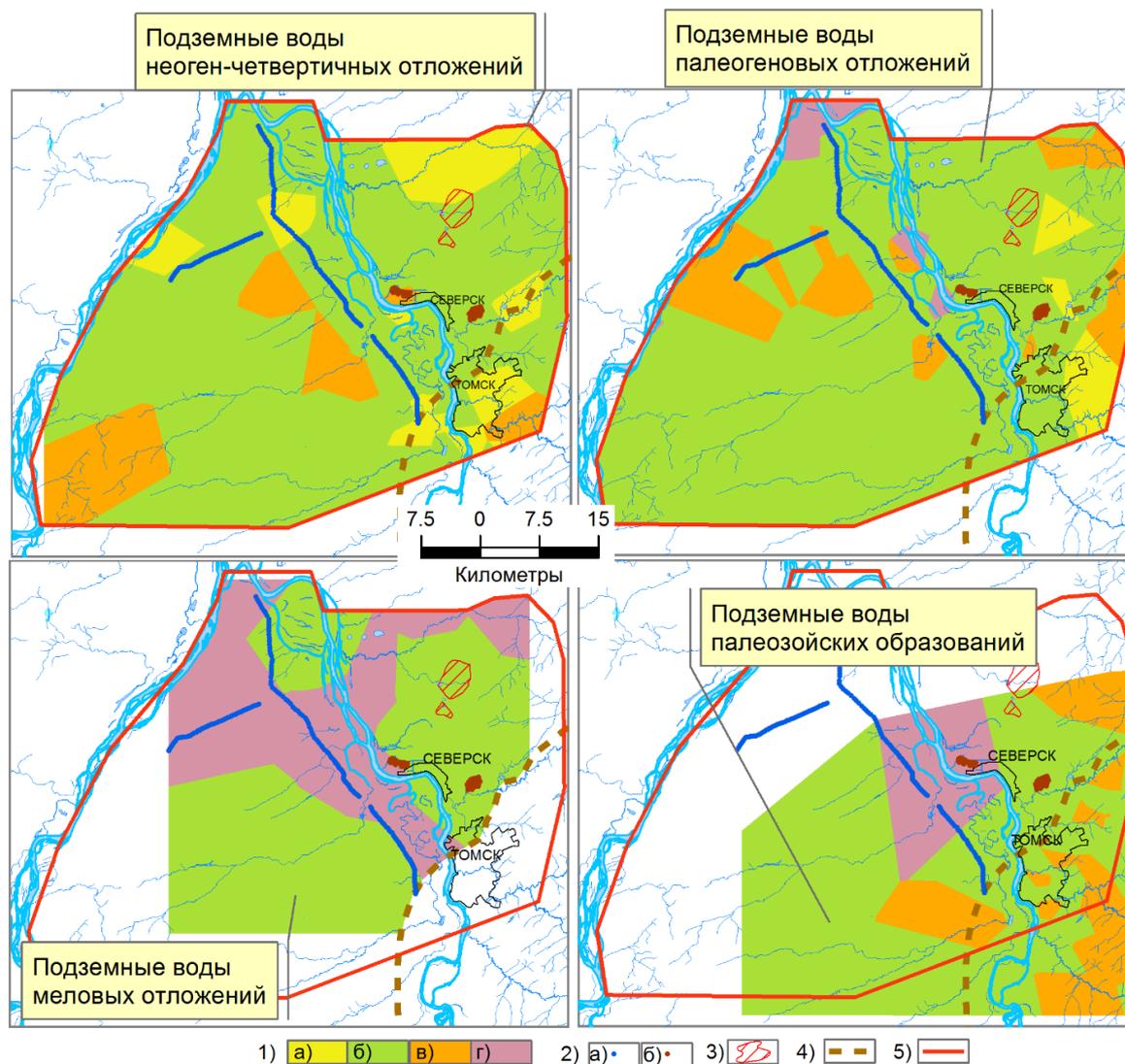


Рисунок 7 – Схематическая карта распространения геохимических типов вод в водоносных комплексах гидрогеоэкологического полигона «Томский»

Условные обозначения: 1) геохимические типы вод: а) алюминиево-кремнистый, б) кремнистый кальциево-магниевый, в) кремнистый карбонатно-кальциевый; г) кремнисто-натриевый; 2) эксплуатационные скважины водозаборов: а) Томского, б) Северских; 3) площадки ЖРО; 4) граница между ЗСАБ и САГСО; 5) контуры полигона «Томский»

В каждой однородной выборке определены базовые параметры химических элементов (геохимической фон) для дальнейшей эколого-геохимической оценки, как в целом для территории полигона «Томский» (таблица 3), так и для каждого водоносного комплекса отдельно.

Анализ поведения химических компонентов в водах однородных гидрогеохимических совокупностей выявил определенные закономерности в их распределении (таблица 3). Отмечается увеличение значений общей минерализации, рН, Si, Na⁺, Ca²⁺ с последовательным переходом от алюминиево-кремнистых вод к кремнистым кальциево-магниевым водам, т. е. с увеличением времени взаимодействия в системе вода–порода. Для железа общего и перманганатной окисляемости замечена обратная закономерность: более высокие концентрации их формируются на более ранней стадии формирования состава

вод. Так, среднее содержание железа в алюминиево-кремнистых водах составляет 4,96 мг/л, а в кремнистых карбонатно-кальциевых водах – 2,5 мг/л.

Таблица 3 – Распространенность химических элементов в геохимических типах вод гидрогеоэкологического полигона «Томский», мг/л

Компоненты	Геохимический тип вод							
	алюминиево-кремнистый		кремнистый кальциево-магниевый		кремнистый карбонатно-кальциевый		кремнисто-натриевый	
	х	σ	х	σ	х	σ	х	σ
рН, ед, рН	7,0	0,3	7,4	0,2	7,8	0,2	7,4	0,3
Σ солей	260,0	72,0	454,3	1,3	628,6	92,2	631,0	1,4
ОП, мгО ₂ /л	2,48	1,45	2,32	1,55	2,18	1,72	2,00	0,65
NH ₄ ⁺	0,64	0,21	0,80	0,32	0,88	0,50	1,14	0,55
NO ₃ ⁻	0,58	2,82	0,60	2,40	0,59	2,65	0,84	3,12
NO ₂ ⁻	0,08	4,59	0,05	3,58	0,04	4,68	0,05	3,71
HCO ₃ ⁻	142,9	1,5	294,8	1,4	423,6	1,2	234,7	1,5
Cl ⁻	6,04	1,80	3,67	1,71	5,33	3,58	119,29	3,55
SO ₄ ²⁻	8,17	3,52	4,87	1,87	8,29	2,02	4,37	2,17
F ⁻	0,26	3,88	0,24	1,47	0,23	1,69	0,22	1,60
Ca ²⁺	41,9	16,4	65,3	1,4	102,0	1,2	48,5	2,1
Mg ²⁺	7,5	1,8	15,7	1,5	21,3	5,9	20,4	2,2
Na ⁺	6,9	1,5	9,6	1,6	12,7	1,8	102,4	2,0
K ⁺	1,3	2,1	1,3	1,5	1,4	1,3	5,0	1,6
Si	5,8	2,1	8,9	1,2	9,8	2,2	10,6	2,6
Fe _{общ}	5,10	2,35	4,35	2,03	2,51	2,09	4,39	1,88
Mn	0,23	3,33	0,24	1,89	0,28	2,23	0,15	1,95
Zn	0,03	3,71	0,02	3,45	0,01	3,51	0,01	3,16
Cu	0,02	4,17	0,02	2,90	0,01	6,11	0,01	5,50

Примечание. х – среднее содержание; σ – стандартное отклонение; ОП – перманганатная окисляемость.

Для дифференциации территории по уровням фоновых концентраций элементов в подземных водах подготовлен комплект схематических карт. Так как для изучаемой территории наиболее характерными во всех водоносных отложениях являются кремнистые кальциево-магниевые воды, то и фоновые значения компонент на большей площади соответствуют кремнистым кальциево-магниевым водам. В качестве примера приведена схематическая карта фоновых содержаний хлорид-иона (рисунок 8).

Таким образом, разработанная геоинформационная технология выделения однородных гидрогеохимических совокупностей в водоносных комплексах, с учетом взаимодействия системы вода–порода, позволила получить базовые параметры распределения химических элементов (характеристики геохимического фона) в подземных водах для дальнейшей эколого-геохимической оценки качества вод.

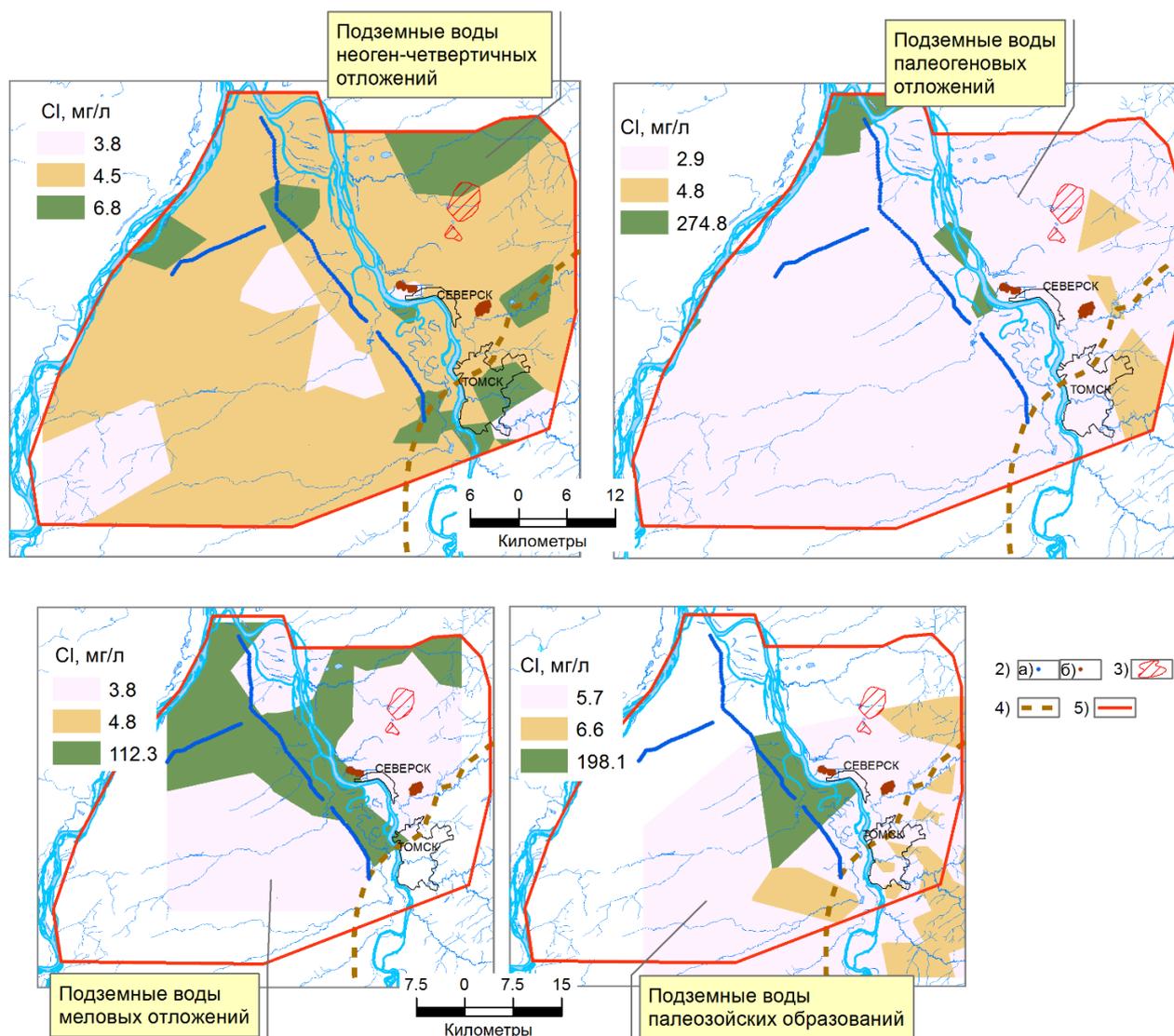


Рисунок 8 – Схематическая карта фоновых содержаний хлорид-иона в подземных водах гидрогеоэкологического полигона «Томский»

Условные обозначения: 2) эксплуатационные скважины водозаборов: а) Томского, б) Северских; 3) площадки ЖРО; 4) граница между ЗСАБ и САГСО; 5) контуры полигона «Томский»

Третье защищаемое положение. Коэффициенты контрастности, определенные относительно базовых параметров, позволяют обнаруживать формирующиеся геохимические аномалии в подземных водах и идентифицировать избыточное поступление химических элементов преимущественно техногенного происхождения.

Технология эколого-геохимической оценки состояния среды предполагает сравнение имеющихся данных с какой-либо принятой нормой: кларки концентраций, ПДК, фоновые концентрации и др. (А.И. Перельман, В.А. Алексеенко, Н.С. Касимов, М.А. Глазовская, Ю.Е. Сает, А.П. Соловов, Н.И. Сафронов и др.). Нами для эколого-геохимической оценки подземных вод, по аналогии с показателем контрастности [Сафронов, 1971; Справочник, 1990], используемым при геохимических поисках для выявления слабых аномалий, применен коэффициент контрастности. Особенность коэффициента контрастности состоит в том, что при вычислении значений в точках, кроме сравнения с нормой

(геохимическим фоном), учитываются и природные колебания, свойственные природным объектам, что позволяет снивелировать влияние естественных факторов на значение: $KK = (C_i - C_{\phi}) / \sigma$, где KK – коэффициент контрастности, C_i – содержание элемента в точке опробования, C_{ϕ} – фоновое значение, вычисленное как среднее значение для каждой однородной гидрогеохимической совокупности, σ – стандартное отклонение.

Коэффициент контрастности служит мерой слабой аномальности концентрации элемента относительно фона с учетом амплитуд свойственных ему природных колебаний. В результате преобразований создается массив нормированных данных (коэффициентов контрастности), что позволяет систематизировать данные на выборки разной степени аномальности: фоновые – KK от -1 до 1 ; минимально-аномальные – KK от 1 до 2 (-2 до -1); умеренно-аномальные – KK от 2 до 3 (-3 до -2); резко-аномальные – KK более 3 (менее -3).

Для каждого показателя качества вод в отобранных для исследования скважинах определен коэффициент контрастности относительно базовых параметров и создан массив нормированных данных (рисунок 9).

Скважина	Горизонт	KK_ОП	KK_Cl	KK_SO ₄	KK_NH ₄	KK_NO ₃	KK_NO ₂	KK_Fe	KK_Mn
5ру	N-Q	5.35	7.09	2.07	4.83	2.33	2.31	2.22	6.23
3ру	Pg	7.04	5.80	-0.52	6.27	1.99	1.00	1.73	4.92
2Нпс	N-Q	0.11	4.66	3.64	9.16	-0.34	0.09	2.13	2.87
ТМ-284/2	PZ	1.03	8.34	4.58	2.29	0.26	1.59	0.84	1.08
343р	N-Q	0.71	4.52	0.51	3.18	0.36	2.38	2.16	2.18
69р	N-Q	1.08	4.18	2.25	1.89	1.51	1.16	0.58	0.45
ТМ-268	PZ	-1.26	6.72	4.40	1.44	1.55	0.88	0.25	0.54
66Ар	N-Q	-0.32	4.55	3.99	0.53	0.02	0.68	1.53	2.13
4гр	N-Q	0.05	4.75	2.35	1.24	0.95	0.07	1.17	1.05

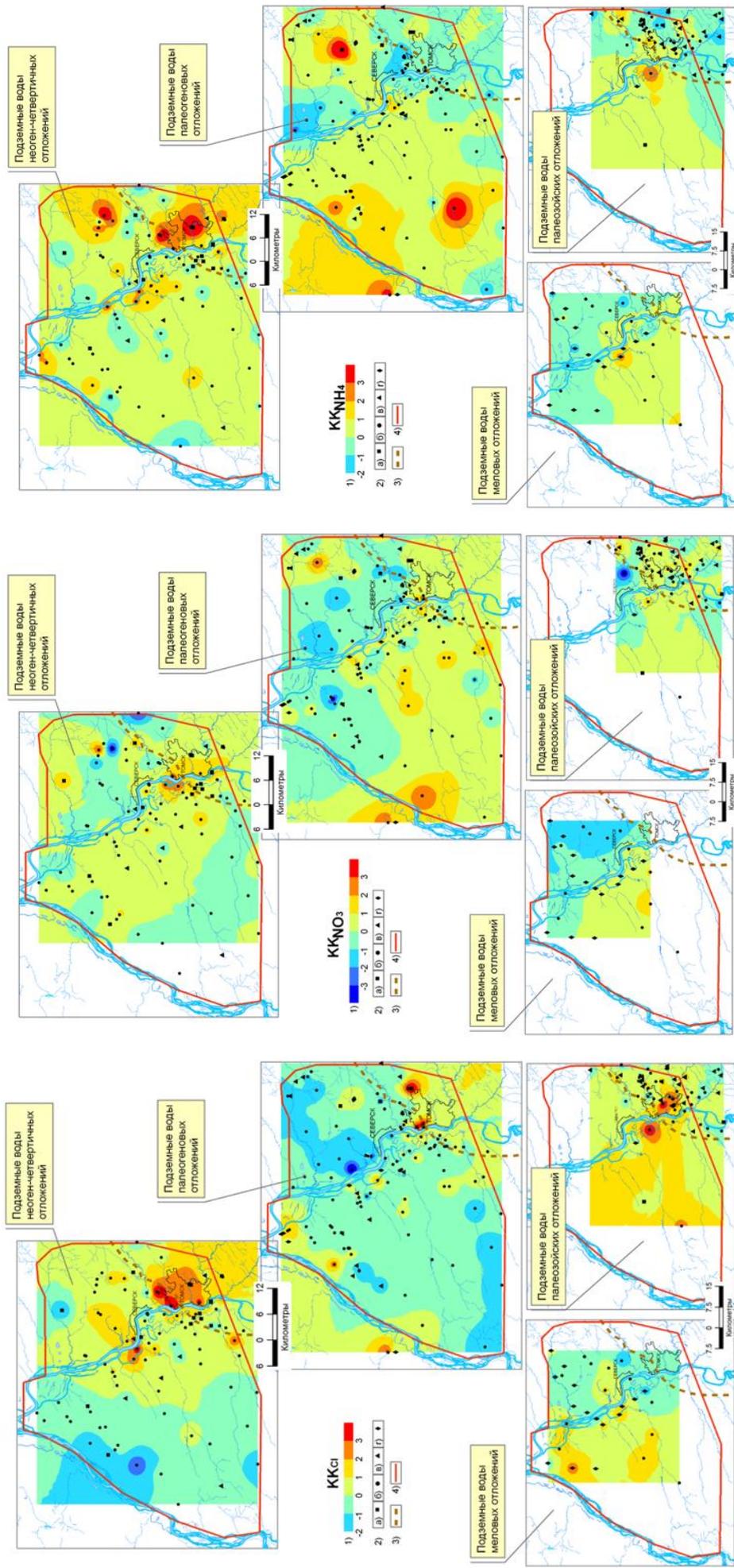
Цветом выделены значения разной степени аномальности: фоновые, минимально-аномальные, умеренно-аномальные, резко-аномальные.

Рисунок 9 – Пример массива нормированных данных

Нормированные данные служат основой создания унифицированных схем с использованием геоинформационных технологий для изучения неоднородности территории по уровням концентрации различных компонентов подземных вод.

Унифицированные схемы позволяют проследить пространственные особенности проявления повышенных концентраций отдельных элементов, вероятнее всего техногенного происхождения, поскольку в используемом подходе к определению нормативных показателей учитывается повышенный природный фон в каждой точке исследования.

Очаги преимущественно антропогенного загрязнения по значениям коэффициента контрастности в подземных водах выделяются по уровням концентрации хлорид-иона, нитрат-иона, иона аммония, которые наиболее проявляются в пределах неоген-четвертичного водоносного комплекса (рисунок 10).



хлорид-ион

нитрат-ион

ион аммония

Рисунок 10 – Районирование территории по уровням концентрации элементов в подземных водах гидрогеоэкологического полигона «Гомский»

Условные обозначения: 1) величина коэффициента контрастности; 2) геохимический тип вод: а) алюминиево-кремнистый, б) кремнистый кальциево-магнийевый, в) кремнистый карбонатно-кальциевый, г) кремнисто-натриевый 3) граница между гидрогеологическими структурами; 4) контуры полигона «Гомский»

Таким образом, использование коэффициента контрастности как меры слабой аномальности содержаний элементов относительно их фона с учетом амплитуд собственных им природных колебаний позволяет проследить пространственные особенности обогащения подземных вод. Поскольку КК – величина безразмерная, имеется возможность идентифицировать очаги потенциального загрязнения подземных вод по отдельным элементам и по комплексу элементов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Создана геоинформационная система «ГГЭП Томский». Основную часть введенной информации в базу данных составляют результаты эколого-геохимических исследований, проведенных на территории полигона «Томский». Все данные систематизированы и хранятся в структурированной взаимосвязанной форме от точки наблюдения до различных видов анализа по отдельным компонентам природной среды, что позволяет, используя технологию геоинформационных систем, комплексно оценивать и прогнозировать изменения природной среды под воздействием природных и антропогенных факторов.
2. Выделены зоны различной интенсивности трансформации почв и снегового покрова с помощью геоинформационных технологий.
3. Разработана технология оценки эколого-геохимического состояния подземных вод на основе выделения и анализа их геохимических типов.
4. Выделены геохимические типы подземных вод: алюминиево-кремнистые (воды, равновесные с каолинитом); кремнистые кальциево-магниевые (воды, равновесные с Са-Mg-монтмориллонитами); кремнистые карбонатно-кальциевые (воды, равновесные с кальцитом); кремнисто-натриевые (воды, равновесные с Na-монтмориллонитами), в том числе и среди вод одного стратиграфического подразделения, которые рассматриваются как однородные геохимические совокупности при определении базовых параметров состава вод. Преобладающим является кремнистый кальциево-магниевый геохимический тип.
5. Определены базовые параметры геохимического фона элементов подземных вод, составляющие основу для дальнейшего исследования эколого-геохимического состояния вод гидрогеоэкологического полигона «Томский».
6. Применение методов нормирования позволило снивелировать проявление избыточных природных концентраций элементов и обосновать выделение очагов антропогенного загрязнения вод элементами. Скважины с выявленным потенциальным загрязнением рекомендованы для наблюдения в процессе мониторинга подземных вод.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях, входящих в перечень ВАК или международные реферативные базы данных

1. **Янкович, Е.П.** Распространенность геохимических типов подземных вод Обь-Томского междуречья [Электронный ресурс] / Е.П. Янкович, Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 107(03). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/03/pdf/96.pdf>

2. **Янкович, Е.П.** Распространенность химических элементов в геохимических типах вод Обь-Томского междуречья [Электронный ресурс] / Е.П. Янкович, Ю.Г. Копылова, К.С. Янкович // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/122-21236>
3. **Янкович, Е.П.** Химический состав подземных вод как фактор риска для здоровья населения (на примере Томского района Томской области) [Электронный ресурс] / Е.П. Янкович, Н.А. Осипова, В.А. Льготин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/3/524.pdf>
4. **Янкович, Е.П.** Оценка индивидуального канцерогенного риска для здоровья населения г. Томска по данным геохимического состава пылеаэрозольных выпадений / Е.П. Янкович, Н.А. Осипова, Е.Г. Языков, А.В. Таловская // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2011. – № 5 – С. 67–74
5. **Янкович, Е.П.** Интегральная оценка рисков водопользования средствами ARCGIS [Электронный ресурс] / Е.П. Янкович, О.Г. Невидимова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/6/945.pdf>
6. **Янкович, Е.П.** К методике расчета содержания элементов в депонирующих средах / Е.П. Янкович // Вычислительные технологии – 2008. – Т. 13, часть III.– С. 393–397
7. Патент № 2298212 Российская Федерация, МПК G 01 V9/00. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды / Рихванов Л.П., Языков Е.Г., Барановская Н.В., Янкович Е.П.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 01200504848; Заявлено 04.07.2005; Опубликовано 27.04.07. – 6 с.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662947 РФ. Систематизация подземных вод по геохимическим типам на основе исследования состояния равновесия вод с алюмосиликатными минералами / **Янкович Е.П.** (РФ); заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет; заявка № 2015619861 от 19.10.2015 г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.12.2015 г., опубл. 20.01.2016, Бюл. № 1.
9. **Yankovich, E.P.** Methods of Statistical Control for Groundwater Quality Indicators / E.P. Yankovich, O.G. Nevidimova, K.S. Yankovich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2016.– Vol. 132 – P. 1–5.
10. **Yankovich, E.P.** Public Health Risk Conditioned by Chemical Composition of Ground Water / E.P. Yankovich, N.A. Osipova, K.S. Yankovich, I.A. Matveenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. –2016. – Vol. 33. – P. 1–6.
11. **Yankovich, E.P.** Ecogeochemical characteristics of underground water of Ob-Tom Interfluve (Russia) / E.P. Yankovich, K.S. Yankovich, V.A. Lgotin, G.A. Gulmina // International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2015): Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics: Conference Proceedings, Albena, June 18-24, 2015. – Sofia: STEF92 Technology Ltd. – 2015 – Vol. 1-2 – P. 269–276.

Подписано к печати 20.04.2017. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,16.
Заказ 111-17. Тираж 120 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ