

На правах рукописи

ПОЛЯКОВА Елена Викторовна

**СТРОНЦИЙ-СОДЕРЖАЩИЕ ВОДЫ ЮГО-ВОСТОЧНОГО
БЕЛОМОРЬЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Специальность 25.00.07 – «Гидрогеология»

**Автореферат на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Москва, 2005

Диссертационная работа выполнена в Институте экологических проблем Севера, Уральского отделения Российской Академии Наук (г. Архангельск)

Научный руководитель:

Доктор геолого-минералогических наук Малов Александр Иванович

Официальные оппоненты:

Доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки РФ

Зверев Валентин Петрович

Кандидат геолого-минералогических наук Никитин Ростислав Михайлович

Ведущая организация:

ЗАО Гидрогеологическая и геоэкологическая компания «ГИДЭК»

Защита диссертации состоится 9 декабря 2005 года в 14 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.048.01 при Институте геоэкологии РАН по адресу: 109004, Москва, ул. Николоямская, д. 51.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Институте геоэкологии РАН по адресу: 101000, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2.

Просим Вас принять участие в заседании совета или прислать отзыв в 2-х экземплярах, заверенных подписью и печатью, на имя ученого секретаря Диссертационного совета Д 002.048.01 по адресу: 101000, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2, А/я 145, e-mail: dissert@geoenv.ru, факс 923-18-86

Автореферат диссертации разослан «...» 2005 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета,

Доктор геолого-минералогических наук

С.М. Семенов

Общая характеристика работы

В предлагаемой работе проведен анализ формирования стронций-содержащих вод на территории Юго-Восточного Беломорья (ЮВБ).

Методика анализа формирования подземных вод артезианских бассейнов с учетом их естественно-исторических условий к настоящему времени разработана довольно детально в трудах А.Е.Бабинца, А.Н.Бунеева, М.Г.Валяшко, В.А.Всеволожского, И.К.Зайцева, В.П.Зверева, И.К.Игнатовича, А.И.Короткова, Ф.А.Макаренко, А.И.Малова, Е.В.Пиннекера, К.Е.Питьевой, Е.В.Посохова, В.С.Самариной, А.И.Силина-Бекчурина, С.И.Смирнова, Н.И.Толстихина, С.Л.Шварцева.

По проблеме содержания стронция в подземных водах и возможности использования этих вод для практических целей имеется ряд работ и публикаций М.С.Галицына, С.Р.Крайнова, С.Л.Шварцева, В.М.Швеца и др., но их количества явно недостаточно для полного освещения проблемы. Для исследуемого же региона (ЮВБ) характерна очень слабая освещенность проблемы формирования стронций-содержащих подземных вод, за исключением наших публикаций.

Вместе с тем, стронций является биологически активным элементом. Попадая в организм человека, он изоморфно замещает кальций в костной ткани, что приводит к деформации костной системы в целом. Особенно опасно потребление подземных вод с кальций-стронциевым отношением (Ca/Sr) меньше 100, что является гидрогеохимической предпосылкой возникновения Уровской эндемии.

В последние годы при проведении геолого-разведочных работ ОАО «Архангельскгеология» установлена довольно широкая распространенность стронция в подземных водах Архангельской области. Концентрации его в водных источниках, используемых для водоснабжения значительного количества городов и районных центров (Мезень, Каменка, Карпогоры, Двинской Березник, Шенкурск, Вельск), существенно превышают предельно-допустимые нормы. В связи с этим возникают проблемы использования этих вод для питьевых и лечебных целей. Появляется необходимость нахождения участков с минимальными содержаниями стронция в водах или же – способов очистки подземных вод от этого компонента.

Изучение проблемы формирования стронций-содержащих вод способствует появлению более обоснованных представлений о способах ее разрешения и определяет **актуальность работы.**

Цель работы заключается в выяснении факторов и процессов, контролирующих формирование стронций-содержащих вод на территории Юго-Восточного Беломорья. Для достижения поставленной цели в работе поставлены следующие **задачи:**

- изучить пространственное распределение стронция в горных породах, подземных и поверхностных водах;
- дать количественные оценки подземного химического стока стронция по площади ЮВБ;
- выявить факторы и процессы, контролирующие химический сток стронция;
- оценить возможности практического использования подземных вод на площадях с повышенными содержаниями стронция в водах.

Методика исследований, фактический материал и личный вклад автора. Исследования выполнены на основе геолого-гидрогеологических материалов, собранных и лично полученных автором в период 1999–2004 г.г. Для изучения содержания стронция в подземных и поверхностных водах было проведено опробование скважин, источников, колодцев, а также основных рек ЮВБ и их притоков. Всего отобрано и проанализировано 338 проб, из них 68 отобрано лично автором в ходе экспедиционных работ. Стронций определялся спектральным анализом, а по 59 пробам, включающим все пробы с концентрациями стронция выше 7 мг/л – атомно-адсорбционным. Автором отобрано 20 проб горных пород (15 – на Вихтовском месторождении целестина, 5 – в районе г.Мезень). Остальные данные взяты из материалов ТГФ г.Архангельска. Использовано около 4000 определений стронция в горных породах ЮВБ. Анализ материалов проводился методом теоретических исследований с количественными оценками факторов и процессов формирования подземных вод.

Основные защищаемые положения:

1. Содержание стронция в пресных и солоноватых подземных водах ЮВБ зависит главным образом от содержания его в водовмещающих отложениях. В

ряду песчано-глинистые – сульфатные – карбонатные породы максимальные концентрации стронция имеют место в карбонатных породах, средние – в сульфатных, минимальные в песчано-глинистых.

2. В породах одного и того же литологического состава происходит обеднение стронцием более древних отложений. Это в значительной мере можно связывать с длительностью процесса извлечения стронция подземными водами из горных пород. В целом имеет место перераспределение стронция из более древних краевых частей Мезенской синеклизы на восток, в более молодые бассейны верхнепермского осадконакопления.
3. В породах одного и того же состава и возраста подземный сток стронция непосредственно связан с мощностью перекрывающих четвертичных отложений. Чем более открыты породы для непосредственного контакта с атмосферными осадками, тем выше значения химического стока стронция.
4. На содержание стронция в подземных водах оказывает влияние их химический состав. Стронций хорошо мигрирует в карбонатных и плохо в сульфатных водах. В пресных подземных водах карбонатных отложений казанского яруса верхней перми, наиболее обогащенных целестином, но с практическим отсутствием гипса, при минерализации до 1 г/л уже успевают сформироваться концентрации стронция до 50 мг/л. В слабосоленоватых водах сакмарского яруса нижней перми, в которых стронций появился в результате растворения гипсов и ангидритов, его содержания не превышают 7 мг/л.
5. Формирование стронций-содержащих подземных вод при прочих равных условиях связано с фильтрационными свойствами пород, интенсивностью подземного стока и уровнем современной закарстованности территории. Повышенный водообмен и промытость пород определяют низкие значения химического стока стронция. В тоже время, прослеживается тенденция к росту значений химического стока стронция с увеличением показателей модуля подземного стока и интенсивностью развития карбонатного и сульфатного карста на определенных участках территории.

Научная новизна работы:

- выявлены основные факторы, контролирующие развитие стронций-содержащих подземных вод на территории ЮВБ;
- в формировании стронций-содержащих подземных вод установлена ведущая роль процессов выщелачивания карбонатных и растворения сульфатных пород;
- дана количественная оценка интенсивности химического выветривания карбонатных и сульфатных пород на территории ЮВБ;
- даны оценки возможности практического использования стронций-содержащих подземных вод для централизованного водоснабжения на основе выявленных факторов их формирования.

Практическое значение работы. В работе собран объемный материал по распределению, способам поступления и условиям формирования стронция в подземных водах ЮВБ. С помощью проведенных исследований выделены районы с разной экологической ситуацией в зависимости от значений Ca/Sr отношения в подземных водах. Полученные результаты позволяют оценить перспективность использования стронций-содержащих подземных вод для водоснабжения, а также указать возможности улучшения их качества с целью снижения риска заболеваемости населения.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертационной работы были представлены на международной конференции «Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура» (Архангельск, 2000), международном молодежном экологическом форуме стран Баренц-региона (Архангельск, 2001), XII Ломоносовских международных чтениях (Архангельск, 2001), международной конференции «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения» (Архангельск, 2002), дважды на конкурсе молодых ученых, проводимом Ломоносовским фондом в научной работе «Исследование содержания стронция в подземных водах Беломорско-Кулойского плато и его влияния на организм человека» (Архангельск, 2004).

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 163 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (из 135 наименований); содержит 28 таблиц, 32 рисунка.

Диссертационная работа выполнена в лаборатории экологической радиологии Института экологических проблем Севера УрО РАН. Анализ отобранных нами проб горных пород, подземных и поверхностных вод проводился в производственном химико-аналитическом центре ОАО «Архангельскгеолдобыча». Обширный фактический материал подобран в Архангельских территориальных геологических фондах ОАО «Архангельскгеолдобыча», а также накоплен в ходе экспедиционных работ, проводимых лабораторией экологической радиологии в период с 1999 по 2004 г.г. (с личным участием автора).

Автор выражает глубокую признательность Председателю Президиума Архангельского научного центра чл.-корр. РАН Ф.Н.Юдахину, директору Института экологических проблем Севера УрО РАН дг.-мн Ю.Г.Кутинову, научному руководителю дг.-мн. А.И.Малову, зав. лабораторией экологической радиологии Г.П.Киселеву, оказавшим активную поддержку предложенному направлению исследований и внесшим ряд ценных рекомендаций при написании работы. Также автор благодарит всех сотрудников лаборатории за плодотворную совместную научную и экспедиционную деятельность.

Диссертационная работа выполнена под научным руководством доктора геолого-минералогических наук А.И. Малова.

Содержание работы

В первой главе приводится краткая характеристика особенностей геолого-гидрогеологических условий Юго-Восточного Беломорья.

Территория ЮВБ принадлежит северо-западной окраине Восточно-Европейской платформы. Геологическое строение данного региона определяется его положением в пределах Мезенской синеклизы. В ее строении довольно четко обособляются два структурных этажа: нижний – дорифейский кристаллический фундамент, и верхний – осадочный чехол. Кристаллический фундамент на большей части Мезенской синеклизы имеет архейско-раннепротерозойский

возраст. В составе осадочного чехла на территории ЮВБ присутствуют образования верхнего рифея, верхнего венда, палеозоя и кайнозоя. В основании осадочного чехла залегают верхнерифейские отложения. Вендские песчано-глинистые отложения с угловым несогласием залегают на поверхности рифейских образований и имеют повсеместное распространение на территории ЮВБ. Выделяют редкинский и котлинский горизонты валдайской серии верхнего венда, образующие единый трансгрессивно-регрессивный цикл. В местной стратиграфической классификации редкинскому горизонту соответствует усть-пинежская свита, в составе котлинского горизонта выделяется мезенская и падунская свиты.

Палеозойские образования занимают большую часть территории ЮВБ и включают в себя каменноугольную и пермскую системы. Отложения палеозоя с большим стратиграфическим перерывом залегают на размытой поверхности верхнего венда. Глубина залегания их подошвы возрастает с запада на восток от 18 до 200 м. Кровля выходит непосредственно на поверхность или под отложения кайнозоя. Отложения каменноугольной системы, развитые на территории Беломорско-Кулойского плато (БКП), представлены средним и верхним отделами. Пермские образования на территории ЮВБ имеют широкое развитие. Нижняя пермь – карбонатно-галогенная с незначительным развитием терригенных пород. В ее составе выделяются ассельский и сакмарский ярусы. Верхняя пермь представлена толщей континентальных и прибрежно-морских осадков уфимского яруса, морскими, преимущественно карбонатными отложениями казанского яруса и терригенными образованиями татарского яруса.

Кайнозойские отложения в исследуемом районе покрывают сплошным чехлом поверхность дочетвертичных пород. В их состав входят в основном четвертичные образования. Образования неогена выделяются, предположительно, только в основании разреза толщ, заполняющих переуглубленные палеодолины.

В гидрогеологическом плане северо-западная часть Мезенской синеклизы приурочена к Северо-Двинскому артезианскому бассейну. Гидрогеологическую и гидродинамическую обстановку в артезианском бассейне во многом определяет регионально выдержанный нижнепермский водоупор, представленный гипсово-

доломит-ангидритовой толщей. На территории ЮВБ водоупор присутствует только в восточной части, на западе он эродирован. В зоне свободного водообмена здесь находятся все водоносные горизонты, приуроченные к четвертичным отложениям, а также верхние части водоносных горизонтов и комплексов каменноугольной и пермской систем. Для верхней части гидрогеологического разреза БКП мощностью 100–250 м можно выделить пять основных площадей развития подземных вод различного качества: 1) пресные кондиционные воды; 2) пресные некондиционные воды; 3) солоноватые воды; 4) соленые воды; 5) смешанные воды.

Площадь развития пресных кондиционных вод включает в себя водоносные комплексы песчаников и алевролитов падуновской свиты венда и урзугской свиты среднего карбона, а также карбонатных пород среднего-верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми, представленных известняками и доломитами с редкими прослоями гипсов. Пресные некондиционные воды связаны с водоносными комплексами песчаников и алевролитов турьинской свиты сакмарского яруса нижней перми, песчаников и алевролитов уфимского яруса верхней перми и карбонатных пород казанского яруса верхней перми. Повышенные содержания стронция в этих водах определяют их некондиционность. Развитие солоноватых вод характерно для областей распространения гипсов и ангидритов с прослоями доломитов, песчаников и алевролитов соткинской свиты и карбонатных пород кулогорской и полтинской свит сакмарского яруса нижней перми, а также огипсованных песчаников и алевролитов с прослоями глин, мергелей, доломитов и известняков уфимского яруса верхней перми. Площадь соленых вод приурочена в основном к пониженным частям территории и (или) к участкам с повышенной мощностью чехла четвертичных отложений, в том числе к зонам развития переуглубленных палеодолин. Смешанные воды характерны для водоносных комплексов четвертичных отложений речных долин.

Во второй главе приведены количественные характеристики развития стронций-содержащих подземных вод и выветривания горных пород на территории ЮВБ. Установлена неравномерность распределения стронция в

горных породах. Наиболее низкие содержания характерны для областей развития песчано-глинистых отложений венда, карбонатных пород среднего и верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми, а также для четвертичных образований. Для этих отложений средние значения содержания стронция составляют: в породах венда – 10 мг/кг, карбона – 71 мг/кг, ассельского яруса нижней перми – 363 мг/кг. (Кларк стронция в осадочных породах составляет 450 мг/кг, в песчаниках – 200 мг/кг, в карбонатных породах – 610 мг/кг). Для пермских отложений средние значения содержания стронция в породах следующие: в гипсоносных породах сакмарского яруса нижней перми и алевролито-мергелевых отложениях уфимского яруса верхней перми – 1006 и 452 мг/кг, в известняках казанского яруса и в песчано-глинистых отложениях татарского яруса верхней перми – 2400 и 2000 мг/кг соответственно.

На рисунке 1 показана карта распределения стронция в подземных водах зоны активного водообмена.

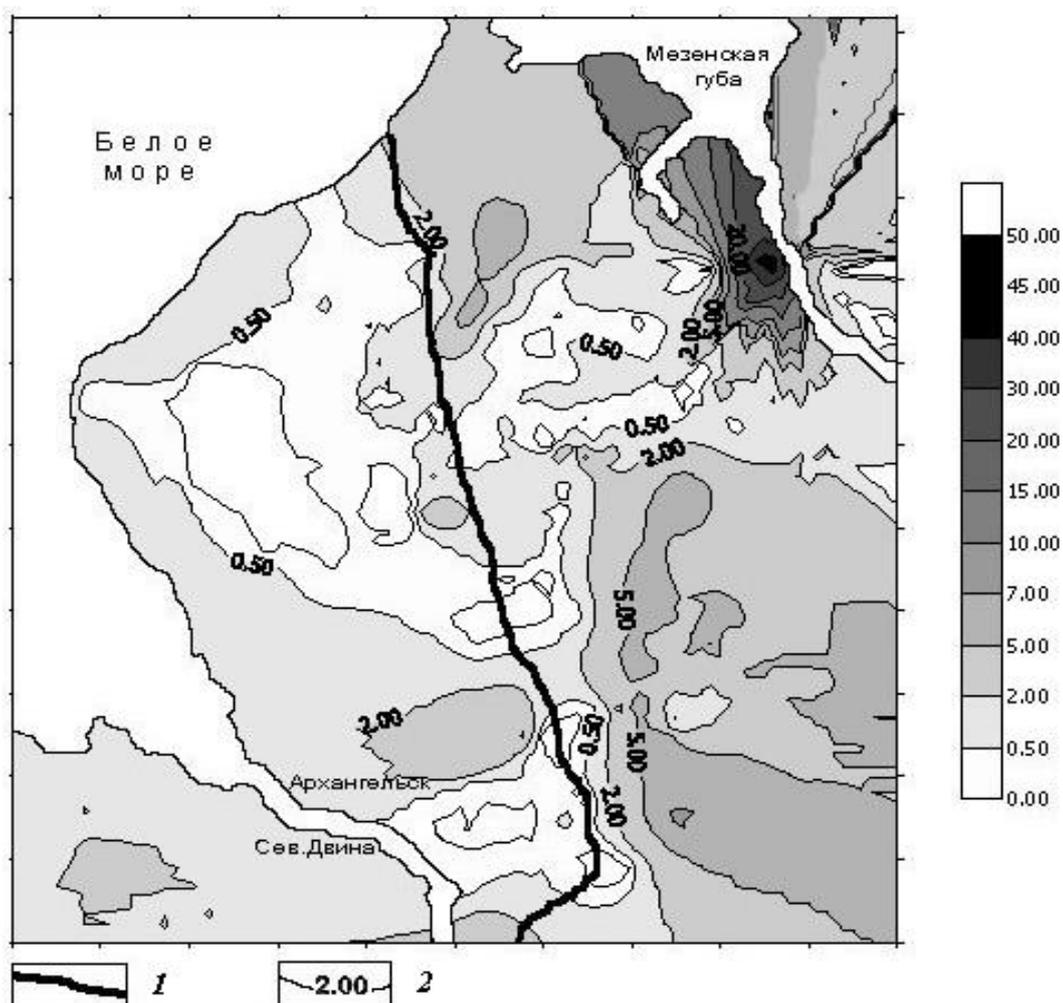


Рис. 1 Распределение стронция в подземных водах зоны активного водообмена:
1 – граница сакмарского яруса нижней перми; 2 – изолинии содержаний стронция, мг/л

Из карты видна отчетливая взаимосвязь содержаний стронция в подземных водах и водовмещающих породах.

Минимальные содержания стронция (0–2 мг/л) характерны для подземных вод, развивающихся в отложениях венда, карбона и ассельского яруса нижней перми. В пермских породах, распространенных восточнее показанной на рисунке границы сакмарского яруса, содержания стронция существенно возрастают: от 2–7 мг/л вблизи границы сакмарского яруса нижней перми до 7–50 мг/л на правом берегу реки Кулой, на площадях развития отложений верхней перми. Аномально высокие значения стронция до 50 мг/л отмечаются в районе нижнего течения р. Мезень (г. Мезень, пос. Каменка).

На рисунке 2 изображена карта распределения стронция в поверхностных водах, которая практически повторяет характер распределения его в подземных водах. Обобщенные данные по содержаниям стронция в горных породах, подземных и поверхностных водах сведены в таблице 1.

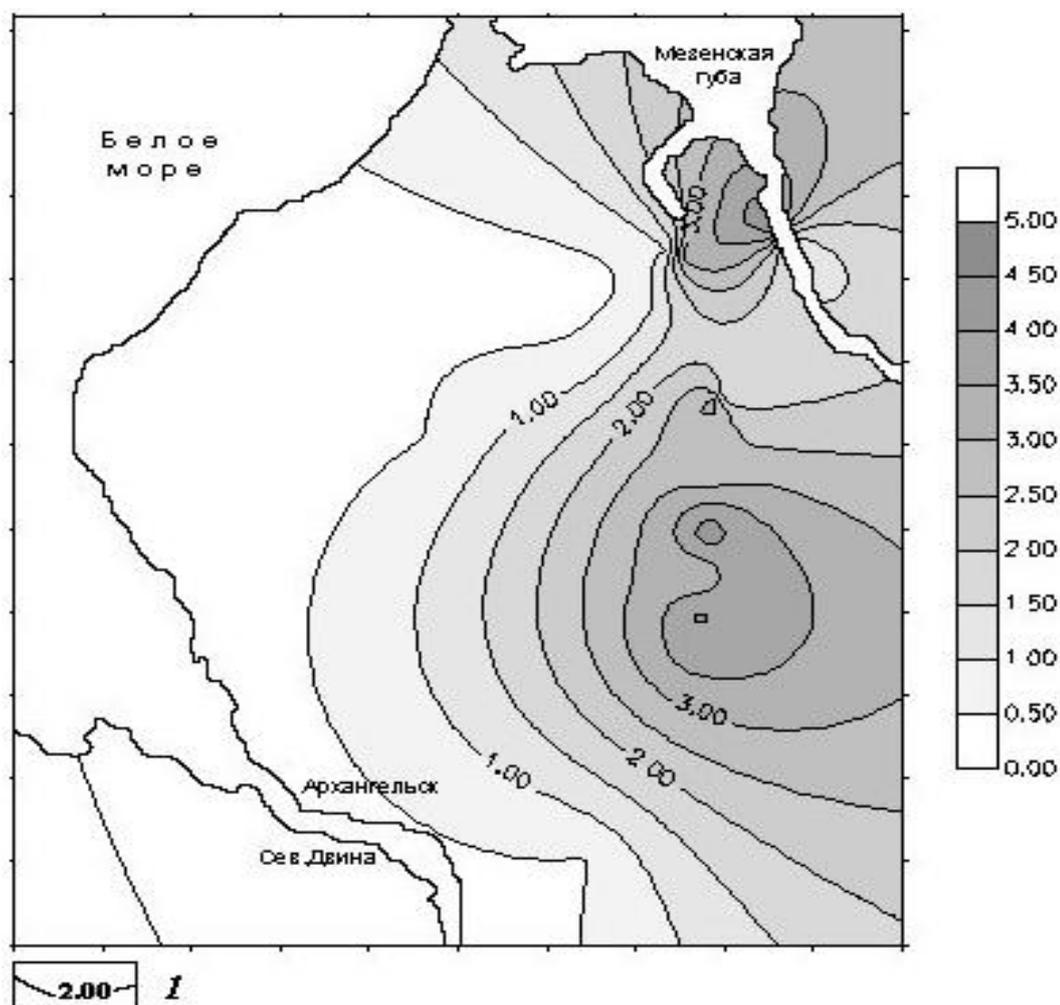


Рис. 2 Распределение стронция в поверхностных водах
I – изолинии содержаний стронция, мг/л

Таблица 1

Средние содержания стронция в горных породах, подземных и поверхностных водах на территории ЮВБ

Водовмещающий комплекс	Литологический состав пород	Средние содержания стронция в		
		горных породах, мг/кг	подземных водах, мг/л	поверхностных водах, мг/л
P _{2t1-kz2}	Мергели и алевролиты с прослоями глин, известняков, песчаников	2000	7	2,6
P _{2kz}	Известняки с прослоями мергелей и песчаников, мергели	2400	20	4,5
P _{2u}	Алевролиты, мергели	452	5	2,7
P _{1s}	Доломиты и известняки с прослоями гипсов, гипсы и ангидриты	1006	7	3,5
P _{1a}	Доломиты с прослоями известняков, гипсов и песчаников	363	2	0,5
C ₂₊₃	Известняки, доломиты	71	0,7	0,5
Vpd	Песчаники, аргиллиты, алевролиты	10	0,5	0,1

По фондовым данным, с использованием материалов В.В.Долгополова, Г.С.Черных, Л.Н.Ивановой (1980), а также В.В.Долгополова и Р.С.Штенгелова (1987), составлена схема модулей подземного стока 95% обеспеченности (рис.3). На схеме выделены гидрогеологические районы, отличающиеся разными условиями формирования подземного стока, разным строением зоны интенсивного водообмена, сменой роли тех или иных водоносных комплексов в формировании общего подземного расхода. На исследуемой территории величины модулей подземного стока изменяются от 0,1 до 10 л/с·км². Широкий диапазон изменений значений модулей подчеркивает сложность гидрогеологических условий территории.

Используя схему модулей подземного стока (рис.3), а также карту распространения стронция в подземных водах (рис.1), мы попытались дать примерные количественные оценки величин химического стока Sr²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻ на территории ЮВБ. Величина химического стока (Q) по формуле:

$Q = M \cdot C$, где M – модуль подземного стока 95% обеспеченности, л/с·км²;
C – содержание иона в подземных водах, мг/л.

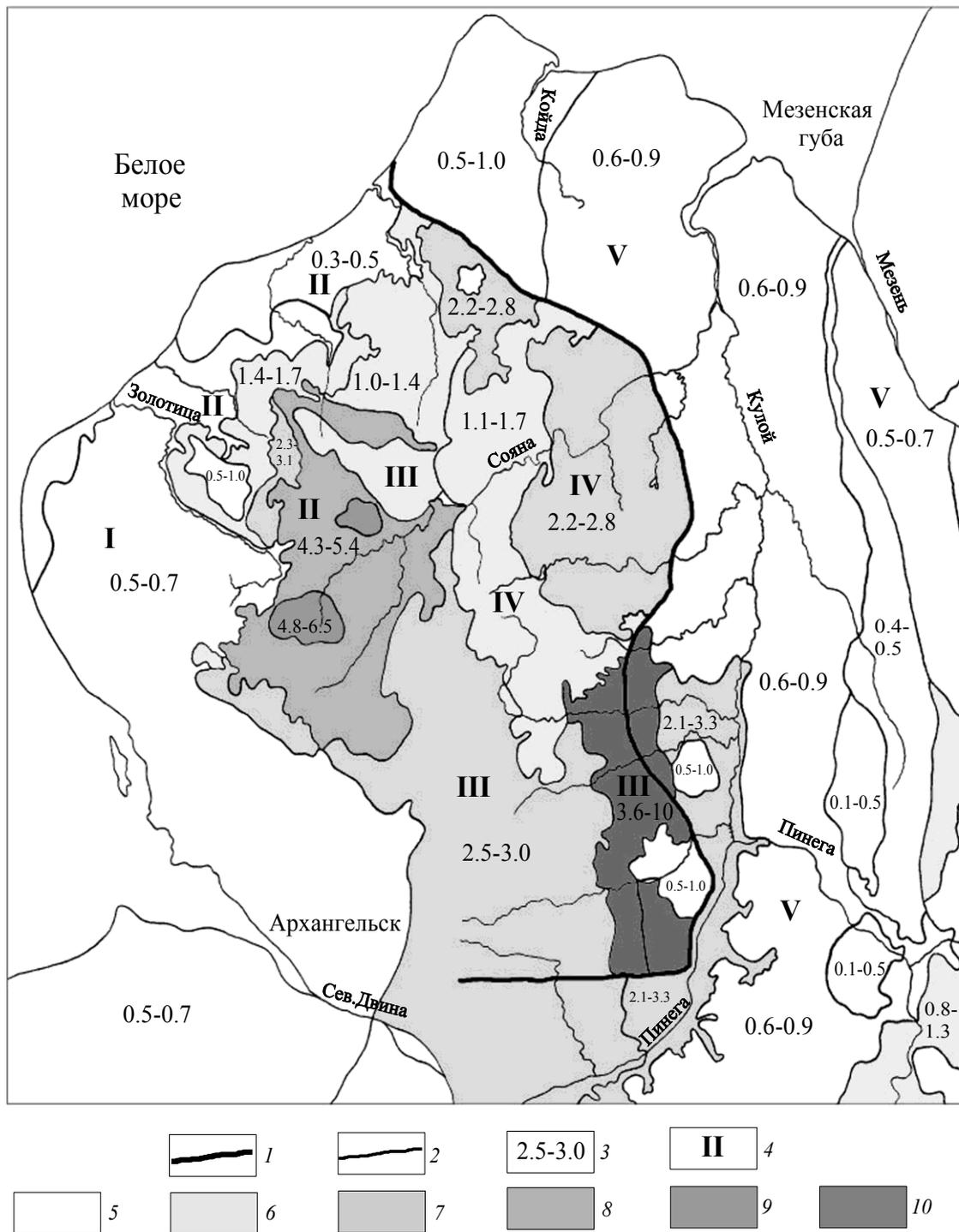


Рис. 3 Схема модулей подземного стока по [Долгополов, 1980, 1987] с дополнением:

1 – граница Беломорско-Кулойского уступа; 2 – граница участков с различными значениями модуля подземного стока; 3 – интервал модуля подземного стока; 4 – гидрогеологический район; 5-10 – средние значения модуля подземного стока, л/с·км²: 5 – 0-1; 6 – 1-2; 7 – 2-3; 8 – 3-5; 9 – 5-6; 10 – 6 и более.

По результатам расчетов построены карты химического стока Sr^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- на территории ЮВБ (приведена только для Sr^{2+} (рис.4)), демонстрирующие

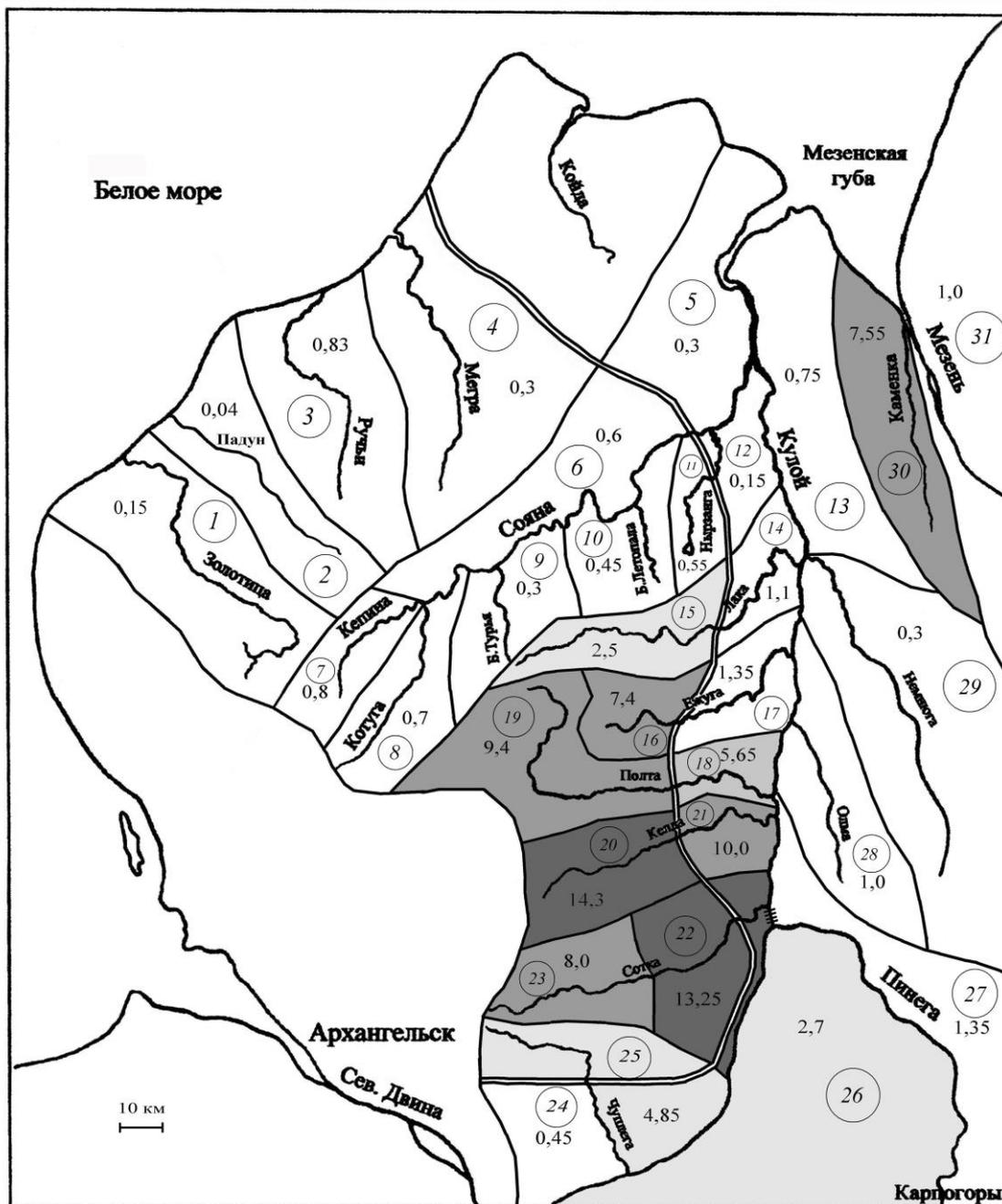


Рис. 4 Карта химического стока Sr^{2+} , т/год·км²:

1 – граница Беломорско-Кулойского уступа; 2 – границы водоразделов; 3 – среднее значение выноса стронция с водосборной площади, т/год·км²; 4 – номер водосборной площади; 5-9 – средние значения выноса стронция, т/год·км²: 5 – 0-2; 6 – 2-5; 7 – 5-7; 8 – 7-10; 9 – 10 и более.

неоднородность распределения значений химического стока ионов. Это связано, прежде всего, с составом водовмещающих пород, а также со значениями модулей подземного стока. Так, максимальные значения химического стока Sr^{2+} , Ca^{2+} и SO_4^{2-} наблюдаются на площадях развития сульфатных пород сакмарского яруса нижней перми, а максимальные значения химического стока HCO_3^- – на площадях

развития карбонатных пород среднего и верхнего карбона, а также ассельского яруса нижней перми. Далее мы оценивали интенсивность растворения сульфатных и карбонатных горных пород на территории ЮВБ. Общее количество растворяющегося целестина на всей территории составляет примерно $5 \text{ т/год} \cdot \text{км}^2$, а на водосборе реки Сотка, где отмечается максимальный сток стронция – почти в 6 раз выше. Общее количество растворяющихся гипсов – примерно $400 \text{ т/год} \cdot \text{км}^2$, а на территории того же водосбора – практически в 9 раз больше. Карбонатов на территории ЮВБ растворяется в среднем $25 \text{ т/год} \cdot \text{км}^2$, а на водосборе реки Кепина, где их сток максимален – примерно в 5 раз выше.

Интенсивность химического выветривания этих пород с течением времени можно рассчитать по формуле: $b = Q \cdot 10^{-3} / \rho$, где b – интенсивность химического выветривания породы, мм/год; Q – общее количество растворяющейся горной породы, $\text{т/год} \cdot \text{км}^2$; ρ – плотность горной породы, г/см^3 .

Учитывая, что рельеф данного района сформировался, в основном, после таяния валдайского ледника (~10000 лет назад), можно предположить, что на территории ЮВБ в среднем за этот период было денудировано до 1,7 м гипсовой и до 0,1 м карбонатной толщи. Целестина, по приблизительным оценкам, было выщелочено количество, эквивалентное слою толщиной 1,2 см.

В третьей главе рассматриваются факторы, контролирующие формирование стронций-содержащих подземных вод на территории Юго-Восточного Беломорья. Основным фактором является состав пород. При одинаковом составе оказывают влияние возраст водовмещающих пород, мощность перекрывающих отложений и химический состав подземных вод. При прочих равных условиях имеют место косвенные факторы – фильтрационные свойства пород, интенсивность подземного стока и развития карбонатного и сульфатного карста.

Первое защищаемое положение. Содержание стронция в пресных и солоноватых подземных водах ЮВБ зависит главным образом от содержаний его в водовмещающих отложениях. Стронций может встречаться в породах любого литологического состава. Большей частью стронций входит в состав карбонатных, сульфатных и песчано-глинистых пород в качестве изоморфных замещений кальция. Также способен образовывать самостоятельные минералы (стронцианит,

целестин) и сорбироваться на глинистых коллоидах. В осадочных породах накопление стронция происходит в основном в процессе испарительного концентрирования морской воды в мелководных, изолированных от моря солеродных бассейнах в условиях аридного климата. На территории ЮВБ подобные бассейны и условия имели место в каменноугольное и пермское время. В первую очередь, при минерализации порядка 70 г/л осаждались карбонаты; затем при минерализации около 140 г/л – сульфаты. Стронций, входя в состав как карбонатных, так и сульфатных минералов, соосаждался и с карбонатами, и с сульфатами. Однако первоначальные максимальные его скопления в виде целестина, как правило, были приурочены к кровле карбонатных отложений.

Переход стронция в подземные воды осуществляется в процессе растворения и выщелачивания горных пород. Растворимость гипсов и ангидритов в пресной воде составляет примерно 2 г/л, целестина – 0,11 г/л, кальцита – 0,06 г/л. Поэтому наиболее интенсивно происходит растворение гипсов и ангидритов с изоморфным Sr^{2+} , затем – целестина и наименее выражен процесс растворения карбонатных пород с изоморфным Sr^{2+} .

На рисунке 5 приведен график зависимости содержаний стронция в подземных водах и горных породах от состава водовмещающих пород.

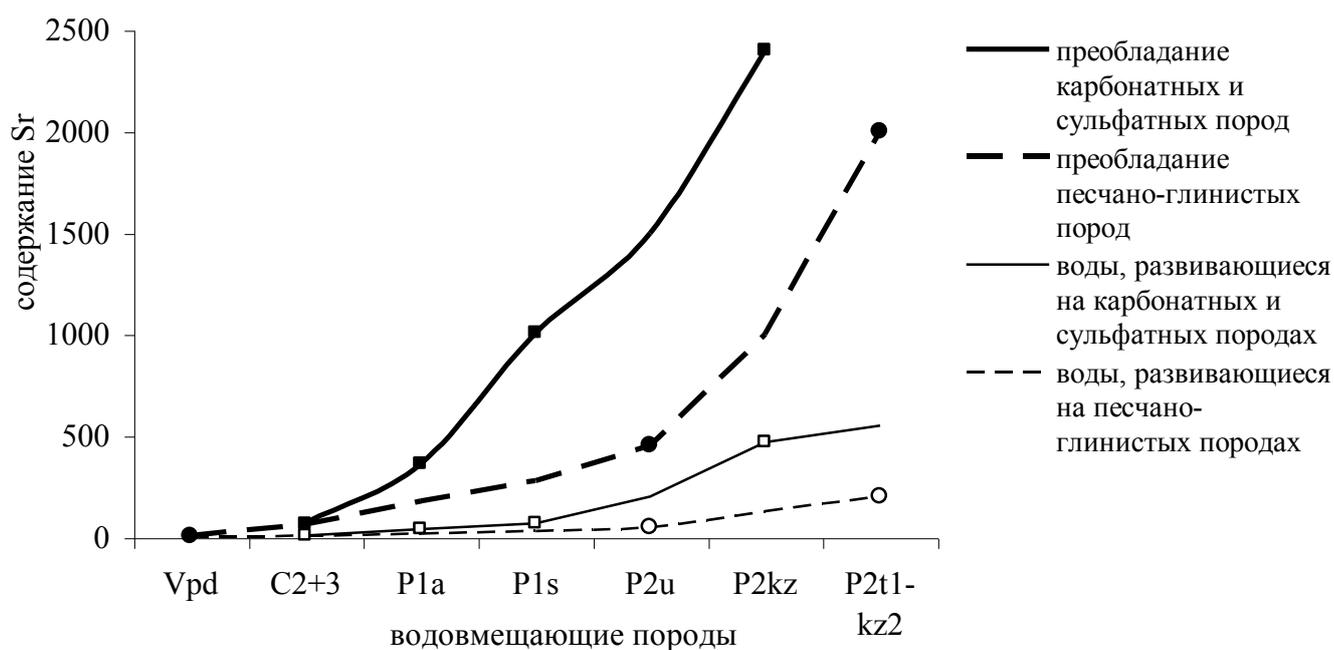


Рис. 5 Сравнительная характеристика распределения стронция в породах с преобладанием карбонатных и сульфатных, и песчано-глинистых разновидностей (мг/кг), а также подземных водах ($n \cdot 10$, мг/л), приуроченных к этим разновидностям.

Из рисунка видно, что содержания стронция в песчано-глинистых породах значительно ниже, чем в породах с преобладанием карбонатных и сульфатных разностей, т.к. в песчано-глинистых отложениях стронций в основном присутствует в сульфатах и карбонатах, заполняющих трещины и входящих в состав цемента. В ряду песчано-глинистые – сульфатные – карбонатные породы максимальные концентрации стронция имеют место в карбонатных породах, средние – в сульфатных, минимальные в песчано-глинистых. Такая же зависимость отмечается и для подземных вод, приуроченных к этим отложениям.

Однако следует заметить, что в более молодых карбонатных отложениях казанского яруса верхней перми концентрации стронция достигают более высоких значений по сравнению с карбонатными породами среднего-верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми. То же наблюдается и в песчано-глинистых породах: в венде стронций практически отсутствует, в уфимском и татарском ярусах верхней перми его содержания существенно возрастают. Таким образом, можно предполагать взаимосвязь между содержанием стронция в подземных водах и возрастом водовмещающих отложений (*второе защищаемое положение*). Чем древнее отложения, тем ниже в них содержания стронция. Это в значительной степени можно связывать с длительностью процесса извлечения стронция подземными водами. В целом имеет место перераспределение стронция из более древних краевых частей Мезенской синеклизы на восток, в более молодые бассейны верхнепермского осадконакопления.

Третье защищаемое положение. В породах одного и того же состава и возраста химический сток стронция непосредственно связан с мощностью перекрывающих четвертичных отложений (рис.6).

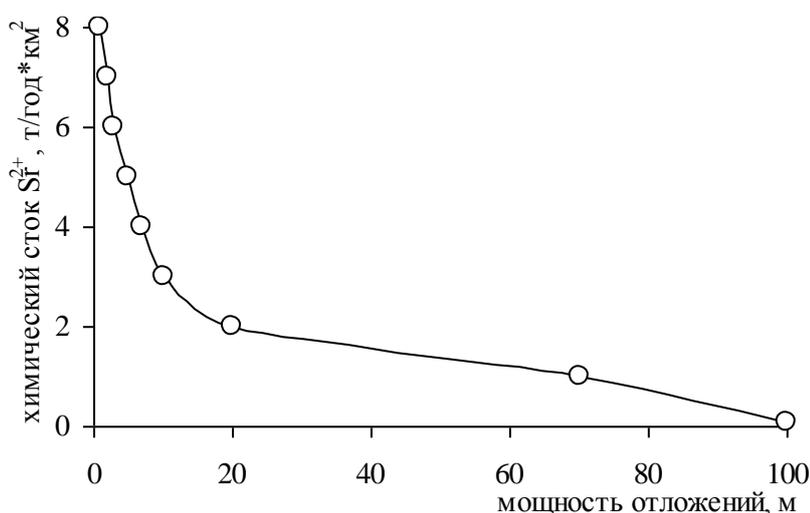


Рис. 6 Зависимость химического стока стронция от мощности перекрывающих четвертичных отложений

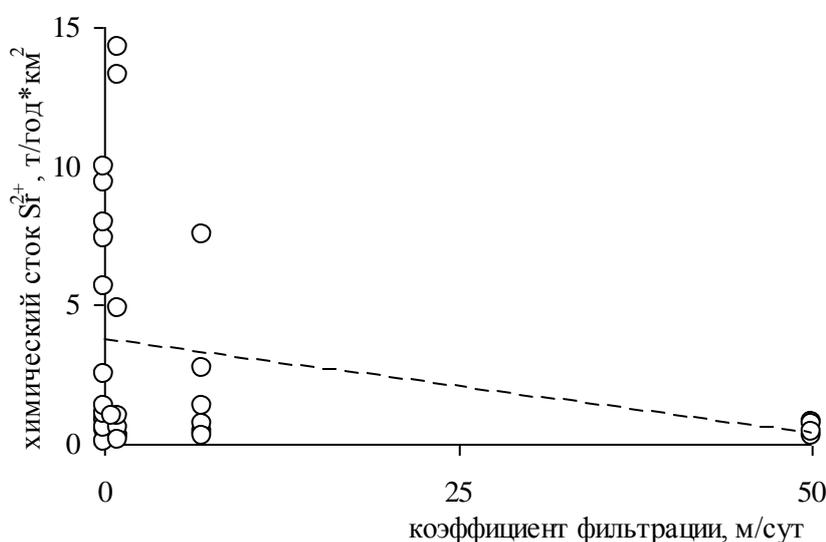
Чем более открыты породы с поверхности, и чем благоприятнее их контакт с агрессивными атмосферными водами, тем выше значения химического стока стронция. Минимальные значения стока стронция (от 0,1 до 1,0 л/с·км²) отмечаются в западной части ЮВБ. Мощность четвертичного покрова достигает здесь 80–100 м. Максимальный сток (от 7 до 14 л/с·км²) выявлен на правобережье реки Кулой, в особенности на водосборах его притоков Полты, Келды и Сотки. Мощность четвертичных отложений на этих участках минимальна (до 10 м и менее), либо они полностью отсутствуют. Таким образом, можно констатировать обратную зависимость между химическим стоком стронция и мощностью перекрывающих четвертичных отложений.

Четвертое защищаемое положение. При одинаковом составе и возрасте пород на содержание стронция в подземных водах оказывает влияние их химический состав. По особенностям водной миграции стронций является «спутником» кальция (термин А.И. Перельмана). Он хорошо мигрирует в гидрокарбонатных водах, но плохо в сульфатных.

В пресных гидрокарбонатных водах, развитых в породах венда, карбона, ассельского яруса нижней перми и четвертичных образованиях, содержания стронция незначительные. Он появляется здесь в результате подтока минерализованных вод из более глубоких горизонтов и разбавления их пресными, а также вследствие растворения немногочисленных гипсовых включений, обогащенных стронцием и целестином. В слабосоленоватых сульфатных водах сакмарского яруса нижней перми концентрации стронция достигают 7 мг/л. Стронций появляется здесь в результате растворения гипсов и ангидритов, слагающих 40–80-метровую толщу пород соткинской свиты. Гипс принадлежит к числу сравнительно легко растворимых минералов. Процесс растворения происходит до его концентрации в воде порядка 2.2 г/л, затем – сменяется осаждением. Но при содержаниях сульфат-иона в растворе более 1 г/л маломинерализованные воды становятся пересыщенными по отношению к сульфату стронция, и он в виде целестина выпадает в осадок. Карбонаты характеризуются более низкой растворимостью. Уже при минерализации порядка 0.5 г/л процесс их растворения сменяется осаждением. При отсутствии

существенных включений гипса с примесями стронция в карбонатах, происходит опережающий рост содержаний растворенного сульфата стронция по сравнению с растворенными карбонатами. В этом случае концентрации стронция в растворе достигают максимальных значений (до 50 мг/л), что отмечается в пресных гидрокарбонатных подземных водах карбонатных отложений казанского яруса верхней перми.

Пятое защищаемое положение. При прочих равных условиях, на формирование стронций-содержащих подземных вод влияют фильтрационные свойства пород, интенсивность подземного стока и развития сульфатного и карбонатного карста. Повышенный водообмен и промытость пород определяют



низкие значения химического стока стронция (рис.7). Максимальные значения коэффициента фильтрации характерны для карбонатных

Рис. 7 Зависимость химического стока стронция от коэффициента фильтрации

отложений среднего-верхнего карбона – ассельского яруса нижней перми, химический сток стронция здесь минимальный. Возможно, что при формировании данных пород, стронций содержался в них в больших количествах (поскольку в более молодых карбонатных породах отмечаются высокие его концентрации), но с течением времени и в связи с поднятием территории ЮВБ был вымыт из них. Кроме того, отмечается тенденция к росту химического стока стронция с увеличением значений модулей подземного стока с территории (рис.8). Объясняется она тем, что максимальные содержания стронция и высокие значения модулей подземного стока характерны для карбонатных и сульфатных пород (в песчано-глинистых породах – минимальны), а также для участков с минимальной мощностью перекрывающих отложений. Совпадение указанных двух факторов ведет к прямой зависимости. В месте с тем, в более древних карбонатных породах

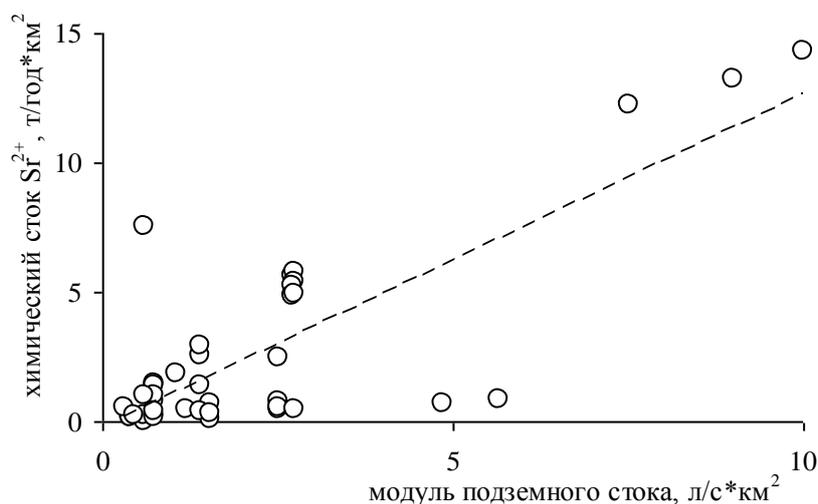


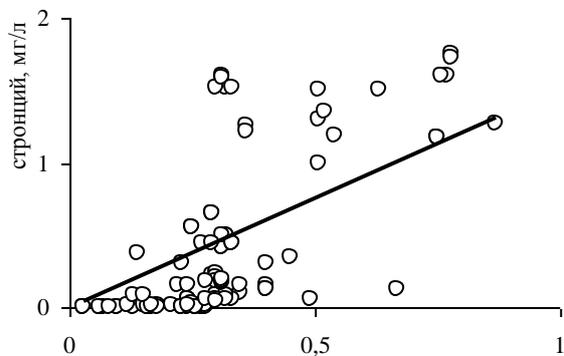
Рис. 8 Зависимость химического стока стронция от модуля подземного стока

значения модуля достаточно велики, тогда как показатели химического стока стронция минимальны. В больших количествах стронций присутствует только в молодых карбонатных отложениях, следовательно, и значения его химического стока выше на этих участках. Таким образом, можно констатировать только тенденцию к росту содержаний стронция в подземных водах при увеличении значений модулей подземного стока территории.

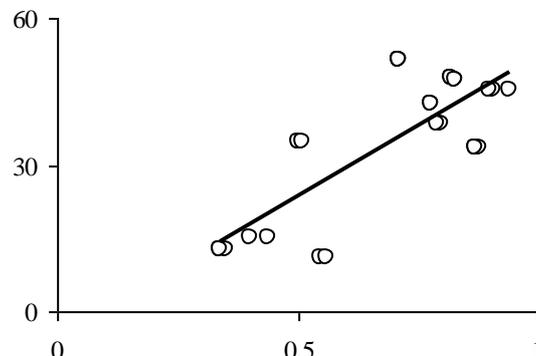
В четвертой главе представлена общая схема формирования стронций-содержащих подземных вод на территории ЮВБ. Рассматриваются зависимости между содержаниями в подземных водах таких ионов, как Sr^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- отдельно по водоносным комплексам венда, среднего-верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми, соткинской свиты сакмарского яруса нижней перми, казанского яруса верхней перми и четвертичных отложений, а также взаимосвязь стронция и минерализации. Установлено, что в подземных водах песчано-глинистых отложений венда не отмечается какой-либо зависимости между содержаниями Sr^{2+} и другими ионами, поскольку концентрации самого стронция здесь минимальны. В пресных подземных водах ассельского яруса нижней перми и среднего-верхнего карбона отмечается его корреляция со всеми рассмотренными ионами, но максимально Sr^{2+} коррелирует с Na^+ и Cl^- , т.к. в этих водах он имеет частично седиментационный генезис. В слабосоленоватых водах сакмарского яруса нижней перми наблюдается практически 100%-ная корреляция Sr^{2+} с Ca^{2+} и SO_4^{2-} , поскольку он появляется при растворении гипсов и ангидритов. В пресных водах верхнепермских отложений четких корреляционных

зависимостей не наблюдается, стронций частично выносится в раствор с ионами Mg^{2+} и Ca^{2+} при растворении известняков и доломитов.

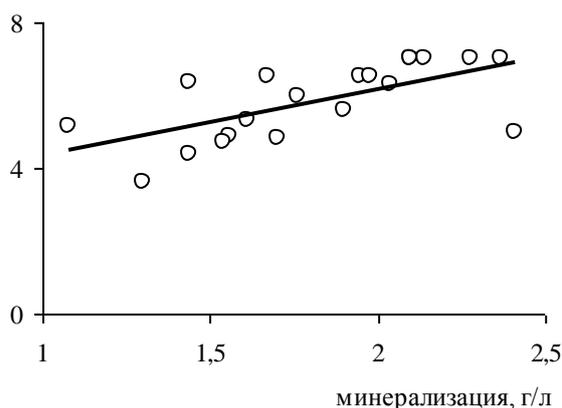
Зависимости содержания стронция в подземных водах от их минерализации (М), представленные на рисунке 9.



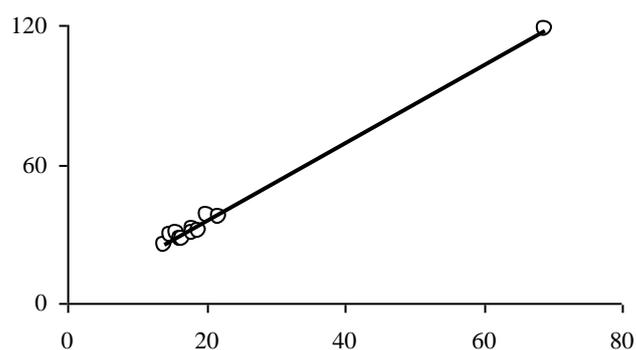
А



Б



В



Г

Рис. 9 Графики зависимостей содержаний стронция в пресных, слабосоленых и соленых подземных водах от их минерализации:

А – для пресных вод с низкими содержаниями стронция (до 2 мг/л); Б – для пресных вод с высокими содержаниями стронция (10-50 мг/л); В – для слабосоленых вод с содержаниями стронция до 7 мг/л; Г – для соленых вод

Для пресных вод с низкими содержаниями стронция (А) характерный средний уровень его концентраций – 0,2% М при разбросе от 0,4 до 0. Для пресных вод с высокими содержаниями стронция (Б) средний уровень – 2,2% М при разбросе от 6,5 до 0,4. Для слабосоленых вод (В) – 0,4% М. Для соленых вод (Г) – 0,15% М.

Также в главе рассмотрены геохимические барьеры, которые приводят к самоочищению подземных вод от стронция – это щелочной карбонатный,

сульфатный, сорбционный глинистый и сорбционный карбонатный. В таблице 2 отражена способность стронция к осаждению на этих барьерах.

Таблица 2

Способность стронция к осаждению на геохимических барьерах

Геохимический барьер	Неорганические формы миграции стронция, способствующие его осаждению на данном геохимическом этапе	Формы осаждения
Щелочной карбонатный	Sr^{2+} , SrCO_3^0	SrCO_3 , соосаждение с CaCO_3
Сульфатный	Sr^{2+} , SrSO_4^0	SrSO_4
Сорбционный глинистый	Sr^{2+}	Соосаждение с различными фракциями глин, особенно с монтмориллонитовыми
Сорбционный карбонатный	Sr^{2+}	Соосаждение с CaCO_3

В пятой главе приводятся экологические и методические аспекты проблемы использования стронций-содержащих подземных вод. Стронций является биологически активным элементом. Попадая в организм человека, он аккумулируется в костной ткани, что может привести к изменению структурной организации костной системы. Наиболее известным эндемичным заболеванием костной системы, связанным с дисбалансом поступающих в организм человека элементов является так называемая Уровская эндемия, или болезнь Кашина-Бека. В качестве гидрогеохимической предпосылки эндемии используется Ca/Sr отношение, значение которого меньше 100 рассматривается как признак экологического неблагополучия территории [В.В.Ковальский, 1974].

На территории ЮВБ можно выделить три района, с различной вероятностью возникновения Уровской болезни. Практически вся территория БКП, за исключением ее юго-восточной и северо-восточной частей, относится к I району, т.е. к району, где вероятность возникновения заболеваний подобных Уровской эндемии отсутствует (Ca/Sr отношение в подземных водах в десятки раз больше 100). Территория развития гипсоносных отложений сакмарского яруса нижней перми и уфимского яруса верхней перми (бассейн р. Кулой и его притоков) относится к району с повышенной вероятностью проявлений заболеваний костно-суставной системы (Ca/Sr отношение в пробах в среднем составляет 60-80).

Территория северной части р. Мезень (г. Мезень и пос. Каменка) относится к III району с высокой вероятностью проявлений заболеваний костно-суставной системы (Ca/Sr отношение в пробах в среднем составляет 9.5).

Решением проблемы использования стронций-содержащих подземных вод может являться применение каких-либо способов их очистки. Создание искусственных барьеров является принципиально новым способом защиты среды от антропогенного и природного загрязнения, в основе которого лежит использование уже имеющихся в природе возможностей к самоочищению. Подземные воды обладают способностью самоочищаться от загрязнений антропогенного и природного происхождения вследствие осаждения нормируемых элементов на геохимических барьерах. С позиций самоочищения подземных вод от стронция к наиболее эффективным можно отнести сорбционный глинистый и карбонатный геохимические барьеры.

В заключении приводятся основные выводы данной работы.

1. На территории Юго-Восточного Беломорья установлена довольно широкая распространенность стронция в подземных водах. Наиболее обогащены стронцием пермские карбонатные и сульфатные отложения. Максимальные концентрации отмечаются в карбонатных породах казанского яруса верхней перми и в приуроченных к ним подземных водах.
2. На территории ЮВБ показана неоднородность распределения значений химического стока Sr^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , что связано, прежде всего, с составом водовмещающих пород, а также со значениями модулей подземного стока. Максимальные значения химического стока Sr^{2+} наблюдаются на площадях развития гипсоносных пород сакмарского яруса нижней перми.
3. Дана оценка интенсивности растворения сульфатных и карбонатных горных пород и выщелачивания целестина. Общее количество растворяющегося целестина на территории ЮВБ составляет примерно $5 \text{ т/год} \cdot \text{км}^2$, гипсов – около $400 \text{ т/год} \cdot \text{км}^2$, карбонатов – $25 \text{ т/год} \cdot \text{км}^2$. За 10000 лет на территории ЮВБ в среднем могло быть денудировано 1,7 м гипсовой и 10 см карбонатной толщи. Целестина могло быть выщелочено количество, эквивалентное слою толщиной 1,2 см.

4. Содержание стронция в подземных водах зависит от состава водовмещающих пород и валовых содержаний в них стронция. В ряду песчано-глинистые – сульфатные – карбонатные породы максимальные концентрации стронция имеют место в карбонатных породах, средние – в сульфатных, минимальные в песчано-глинистых. Но первоначальные максимальные его концентрации в виде целестина приурочены к кровле карбонатных отложений.
5. На развитие стронций-содержащих подземных вод оказывает влияние возраст водовмещающих отложений. В карбонатных, сульфатных и песчано-глинистых образованиях перми концентрации стронция значительно выше, нежели в таковых венда и карбона. В целом имеет место перераспределение стронция из более древних краевых частей Мезенской синеклизы на восток, в более молодые бассейны верхнепермского осадконакопления.
6. Мощность перекрывающих четвертичных отложений определяет химический сток стронция. Чем более открыты с поверхности породы для непосредственного контакта с агрессивными водами атмосферного происхождения, тем выше значения химического стока стронция.
7. На содержание стронция в подземных водах оказывает влияние их химический состав. В сульфатных подземных водах концентрации стронция не достигают высоких значений. В гидрокарбонатных, при условии его значительного содержания в породах, – концентрации достигают максимальных значений.
8. Косвенными факторами, контролирующими формирование стронций-содержащих подземных вод являются фильтрационные свойства пород, интенсивность подземного стока и развития карста на территории ЮВБ. Повышенный водообмен и промытость пород определяют низкие значения химического стока стронция. В тоже время, прослеживается тенденция к росту значений химического стока стронция с увеличением показателей модуля подземного стока и интенсивностью развития карбонатного и сульфатного карста на определенных участках территории.
9. Стронций как биологически активный элемент, попадая в организм человека, вызывает серьезные заболевания костной системы (схожие с Уровской

эндемией). Значение Ca/Sr отношения в подземных водах меньше 100 рассматривается как признак экологического неблагополучия территории. Наибольшей вероятностью проявления заболеваний костно-суставной системы характеризуется район города Мезень и поселка Каменка.

10. Подземные воды обладают способностью самоочищаться от загрязнений антропогенного и природного происхождения вследствие осаждения нормируемых элементов на геохимических барьерах. С позиций самоочищения подземных вод от стронция к наиболее эффективным можно отнести сорбционный глинистый и карбонатный геохимические барьеры.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

- 1) Малов А.И., Тюхтина Е.В. Стронций в подземных водах Юго-Восточного Беломорья /Матер. междунар. конф. «Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура». – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2000. – С. 150
- 2) Тюхтина Е.В. Проблема загрязнения подземных вод природным стронцием /Матер. междунар. молодежного экологического форума стран Баренц-региона. – Архангельск, 2001. – С. 113-114
- 3) Тюхтина Е.В. Стронций в подземных водах Архангельской области /XII Ломоносовские междунар. чтения. – Архангельск: ПГУ им. Ломоносова, 2001. – С. 161-162
- 4) Тюхтина Е.В. Формирование стронций-содержащих подземных вод на территории Беломорско-Кулойского плато /Матер. междунар. конф. «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения». – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2002. – С. 582-584
- 5) Малов А.И., Тюхтина Е.В. Природное загрязнение стронцием подземных и поверхностных вод Архангельской области /Сергеевские чтения. Вып. 4. Мат. годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидроэкологии. – М., ГЕОС, 2002. – с. 382-385
- 6) Полякова Е.В. Кальций-стронциевое отношение в подземных водах как признак экологического неблагополучия /Сергеевские чтения. Вып. 5. Мат. годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидроэкологии. – М., ГЕОС, 2003. – С. 348-351
- 7) Полякова Е.В., Малов А.И. Оценка химического выветривания стронций-содержащих пород на территории Беломорско-Кулойского плато /Матер. всеросс. конф. с междунар. участием «Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов», 13-18 сентября 2004 г. – Архангельск, 2004. Т. II. – С. 176-178
- 8) Полякова Е.В., Малов А.И. Формирование стронций-содержащих подземных вод в Беломорье /Вестник Поморского университета. Серия «Естественные и точные науки». – Архангельск: ПГУ им. М.В. Ломоносова. Вып. 1(7), 2005. – С. 39-46.