

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

***Подсекция
гидрогеологии***

Руководитель – зав. кафедрой, профессор Поздняков С.П.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2026

Содержание:

1. Зависимость проявления радиогеохимического эффекта от состава пластовых вод нефтегазовых месторождений Т.А. Киреева	2
2. Прогнозные расчеты разгрузки контаминантов в воды озера Байкал Я.В. Сорокоумова, А.В. Расторгуев	5
3. Гидродинамическое моделирование в сложных мерзлотно-гидрогеологических условиях Е.Ю. Потапова	10
4. Особенности проявления процесса криогенного концентрирования для вод различного химического состава А.А. Шиманов, И.А. Комаров, Т.А. Киреева, Н.А. Павлова	15
5. Стабильные изотопы кислорода и водорода в свободной, поровой и связанной воде грязевых вулканов Керченско-Таманской области Н.А. Харитонова, Е.С. Казак, Г.А. Челноков, А.В. Ермаков, В.Ю. Лаврушин . . .	18
6. Особенности формирования качества подземных вод проектируемого приречного водозабора Андреевского месторождения А.А. Маслов	22
7. Особенности химического состава поровых вод и донных осадков в зоне разгрузки метана в Карском море А.В. Ермаков	26
8. Новое в системном подходе к геосферам: от временных рядов подземного стока до гравитационного взаимодействия в солнечной системе Б.А. Шмагин	28

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ РАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ СОСТАВА ПЛАСТОВЫХ ВОД НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Т.А. Киреева¹

¹*Московский государственный университет, Москва*

В настоящее время практически все нефтегазовые месторождения эксплуатируются с применением различных технических методов, увеличивающих нефтеотдачу пластов. Одним из основных методов является закачка воды в продуктивные горизонты для поддержания пластового давления (ППД). Для этой цели используются различные воды: поверхностные (речные, озерные, морские), а также подземные, как правило, залегающие выше по разрезу.

При эксплуатации нефтяных месторождений важно контролировать перемещение фронта закачиваемых вод и отслеживать поступление нагнетаемой воды в добывающие скважины, во избежание экстремального обводнения. Часто для этого используется метод радиогеохимического эффекта (РГХЭ), который заключается в многократном увеличении естественной гамма активности пород в интервале продуктивных пластов в процессе их обводнения и проявляется в возникновении новых аномалий на кривых гамма-каротажа (ГК). Это связано с образованием на цементном камне отложений радиобарита, представляющего собой барит, содержащий примесь сульфата радия (RaSO_4).

Радиогеохимический эффект был экспериментально обнаружен более 50-ти лет назад (Алексеев, Хуснуллин, 1965) [3] и используется, как метод отслеживания поступления закачиваемых вод к добывающим скважинам, при разработке месторождений с применением ППД. Следует отметить, что этот эффект не находит широкого применения из-за непостоянства проявления. Причем, объяснение этого «непостоянства» в литературе отсутствует.

При нагнетании воды в залежь в передней части фронта вытеснения образуется буферная оторочка, представляющая собой смесь закачиваемой воды с вытесняемыми остаточными водами залежи. Радий (Ra) в нефтяной залежи сосредоточен в остаточных водах, поэтому буферная оторочка обогащается радием, концентрация которого достигает 3.5-10 Бк/дм³. Новые аномалии на кривых ГК образуются в результате отложения на цементном камне и стенках фильтра радиокальцита и радиобарита, выпадающих при смешении остаточных и закачиваемых вод. Размеры аномалий РГХЭ четко локализованы и, как правило, ограничены размерами интервала поступления в ствол скважины нагнетаемой воды.

Радий довольно распространен в природе, он встречается во многих минералах и минерализованных водах, но в самых ничтожных количествах. Кларк радия в земной коре – $1 \cdot 10^{-10}$ % по массе. Работами Радиового института (в 1926-1932 гг.) было установлено относительно высокое (по сравнению с другими водами) содержание радия в пластовых водах

нефтяных месторождений. Отмечались большие концентрации радия в водах, содержащих барий, видимо, в связи с очень близкими геохимическими свойствами этих элементов.

Радий является химическим аналогом бария, так же как барий является химическим аналогом кальция и стронция. Из солей радия хорошей растворимостью в воде обладают RaBr_2 , RaI_2 , RaCl_2 , а малорастворимыми соединениями являются RaSO_4 , RaF_2 , RaCO_3 . Поэтому во всех глубоких пластовых водах с увеличением минерализации происходит накопление хлоридных солей Ca, Sr, Ba и Ra, в отличие от сульфатов и карбонатов этих элементов.

Крайне малое содержание радия в водах и породах не позволяет этому элементу образовывать самостоятельные солевые отложения. Поэтому он образует изоморфную примесь, в основном в отложениях барита – так называемые радиобариты – $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$. Следовательно, чем больше в пластовых водах будет бария, тем сильнее будет выражен РГХЭ, при условии, что для ППД используются воды, содержащие «лишний» сульфат-ион, по отношению к его содержанию в пластовых водах. Причем, даже весьма незначительное содержание сульфат-иона в водах, приводит к осаждению бария в виде BaSO_4 , потому что растворимость этой соли около 1 мг/л (при ст. усл.). Известно [5], что при содержании в воде иона $\text{SO}_4^{2-} > 35\text{-}40$ мг/л барий практически полностью выводится из раствора.

В литературе нет упоминаний о проявлении РГХЭ в карбонатных коллекторах, в то время как в песчано-глинистых он отмечается повсеместно [2]. Видимо, это связано с сохранением значительного содержания сульфат-иона в пластовых водах карбонатных коллекторов, что связано с частым присутствием гипсовых прослоев. Наличие сульфат-иона в пластовых водах карбонатных коллекторов в количестве до сотен мг/л, препятствует накоплению в них Ba^{2+} .

Так, например, в пластовых водах Среднеботуобинского месторождения (Якутия, PR₃ v) при $M_{\text{общ}}$ около 293 г/л содержится 180 мг/л иона SO_4 , а содержание Ba^{+2} в этих водах составляет всего 1,1 мг/л [4]. При эксплуатации этого месторождения РГХЭ не отмечался.

В водах ниже-меловых и юрских песчано-глинистых коллекторов Западной Сибири с $M_{\text{общ}}$ 10-20 г/л содержится аномально низкое количество сульфат-иона, не более 2-3 мг/л, и одновременно аномально высокое содержание Ba^{+2} – до 35 мг/л [1]. В результате, РГХЭ проявляется постоянно при эксплуатации нефтяных месторождений Западной Сибири с применением ППД.

Использованные источники

1. Киреева Т.А., Корзун А.В. Новые данные о повышенном содержании бария в пластовых водах нижнемеловых и юрских отложений Красноленинского свода (Западная Сибирь) // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, издательство *Изд-во Моск. ун-та* (М.) 2022. № 6. С. 124-128.

2. Кутырев Е.Ф. К вопросу истолкования радиогеохимических аномалий в добывающих скважинах Западной Сибири // Георесурсы. 2008. №5. (28). С. 14-19.
3. Хуснуллин М.Х. Геофизические методы контроля разработки нефтяных пластов. М., Недра. 1989. 190 с.
4. Шарипов Ф.А., Вобликова Е.Ю., Киреева Т.А., Мухаметшин В.Ш., Гилязетдинов Р.А. Прогноз отложения сульфатных солей кальция, бария и стронция при разработке нефтегазоконденсатного месторождения Непско-Ботуобинской антеклизы (Восточная Сибирь) // *[Вестник Московского университета. Серия 4: Геология](#)*, издательство *[Изд-во Моск. ун-та](#)* (М.), 2025. Том 64, № 1, с. 69-77 [DOI](#)
5. Шварц А.А. Эколого-гидрогеологический анализ состояния подземных вод при региональных исследованиях. // Дисс. докт. геол.-мин. н. МО РФ Санкт-Петерб. ГУ. 2003

ПРОГНОЗНЫЕ РАСЧЕТЫ РАЗГРУЗКИ КОНТАМИНАНТОВ В ВОДЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Я.В. Сорокоумова¹, А.В. Расторгуев¹

¹*Московский государственный университет, Москва*

Одним самых значимых источников поступления техногенных веществ в воды озера Байкал является территория Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) [1, 6], который функционировал в период 1964-2013 гг. Площадка предприятия расположена на юго-западном побережье оз. Байкал в Слюдянском районе Иркутской области в г. Байкальске. Площадка комбината расположена в пределах центральной экологической зоны байкальской природной территории, выделенной в ходе экологического зонирования Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. На этой территории, согласно закону РФ № 94-РФ от 01.05.1999 «Об охране озера Байкал», хозяйственная деятельность регулируется с целью охраны поверхностных и подземных вод, разгружающихся в озеро. Соответственно, текущее техногенное воздействие, обусловленное производственными процессами на этом участке побережья, должно быть минимизировано, а уже сформировавшееся за счет ранее осуществляемой деятельности загрязнение должно быть устранено. По данным мониторинга состава подземных вод, проведенного в 2020 г. содержание растворенных нефтепродуктов в подземных водах достигает 17 мг/л (ПДК для БПТ 0,05 мг/л), минерализация подземных вод – более 4,6 г/л (фон – 0,2 г/л), что свидетельствует об активном поступлении загрязнения в подземные воды даже после остановки предприятия, а, ввиду того, что поток подземных вод направлен в сторону озера Байкал, то контаминанты поступают и в его донные отложения, а через них – и в воду.

Рассматриваемая территория относится к первой террасе озера, осложненной пролювиальными конусами выноса по долинам рек Утулик и Солзан [2]. На территории распространен неоген-четвертичный водоносный комплекс, водовмещающие отложения которого мощностью несколько сотен метров [7] представлены плохо отсортированными гравийно-галечниковыми и валунно-галечниковыми отложениями с включением линз и прослоев песчаного, супесчаного и иногда суглинистого состава. В плане горизонт представляет ограниченную область (приуроченную к Утуликской впадине) шириной до 3,7 км между отрогами хребта Хамар-Дабан и озером Байкал. Питание осуществляется, в основном, за счет атмосферных осадков, разгрузка – в озеро Байкал. Подземные воды данного горизонта по химическому составу гидрокарбонатные, с минерализацией до 0,2 г/л, среднегодовая температура составляет 6 °С. Коэффициент фильтрации, по данным опытно-фильтрационных работ варьирует в широких пределах от единиц до сотен м/сут, калибрация модели оптимизации перехватывающего дренажа [3] показала значение 34 м/сут при водоотдаче 0,25.

Для прогнозирования разгрузки контаминантов с подземными водами территории БЦБК была разработана трехмерная геомиграционная модель в программном комплексе Visual Modflow [5]. Моделируемая область представляет собой участок берега озера Байкал, охватывающий известные очаги загрязнения. Пространственная структура потока подземных вод первого от поверхности водоносного комплекса неоген-четвертичных отложений имеет трехмерную форму, ввиду наличия деформаций линий тока, связанных с формированием депрессионной воронки при работе перехватывающего водозабора. Основное направление потока подземных вод в сторону региональной дрены – озера Байкал, характер поверхности потока – безнапорный. Внутренним граничным условием на модели является перехватывающий водозабор, представленный 8 скважинами глубиной 35-70 м, который функционировал 12 лет с неравномерным дебитом.

В первую очередь была решена эпигнозная задача на 20 лет (2002-2022 года), наиболее полно охарактеризованная данными результатов наблюдений за уровнями и составом подземных вод.

В ходе калибровки геофильтрационной модели уточнялось инфильтрационное питание на выявленных участках повышенной техногенной инфильтрации между главным корпусом БЦБК и зданием ТЭЦ, а также в карте №11. В результате, диапазон вариации нормализованной среднеквадратичной ошибки (НСКО) при сопоставлении модельных и наблюдаемых уровней подземных вод для всех стресс-периодов составил ~10-18%.

В качестве начальных условий для геомиграционных расчетов во все слои модели задавались экстраполированные данные мониторинга за 2002 год, а в нижний модельный слой, а также на западной и восточной границах модели задавались фоновые значения.

Решение эпигнозной задачи моделирования миграции консервативного мигранта показало достаточную сходимость с массивом фактических данных (по значению минерализации), с диапазоном изменения нормализованных среднеквадратичных ошибок на весь период эпигнозных расчетов – 12,3-15,7%. Была оценена значимость вклада перехватывающего водозабора и источников загрязнения на разгрузку растворенных минеральных веществ в Байкал.

Калибровка модели переноса растворенных нефтепродуктов показала большее количество источников поступления загрязнения, чем для модели переноса растворенного минерального загрязнения [4]. Диапазон изменения НСКО на весь период эпигнозных расчетов составил 15,5-17,3%. Эпигнозные расчеты показали, что основное уменьшение количества растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории БЦБК связано с процессами биоразложения, описание которых производилось согласно минимальному из характерных, согласно литературным данным, значению константы деструкции.

Далее были выполнены прогнозные расчеты в двух постановках: первая, при которой источники загрязнения остались неизменными; вторая – предусматривала извлечение

источников поступления загрязнения; также каждая постанковка включала два варианта – с запуском перехватывающего водозабора и без него.

Прогнозные расчеты для определения распространения минерального загрязнения, показали (Рисунок 1), что в первой постанковке разгрузка растворенных минеральных веществ через 10 лет будет выше фонового значения на 35%, а при работающем перехватывающем водозаборе – на ~15%, при этом, кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~20%, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов согласно второй постанковке, показано, что разгрузка растворенных минеральных веществ в озеро достигнет фонового значения спустя 8 лет, при этом, при функционирующем перехватывающем водозаборе, на год раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5%, чем в варианте без водоотбора.

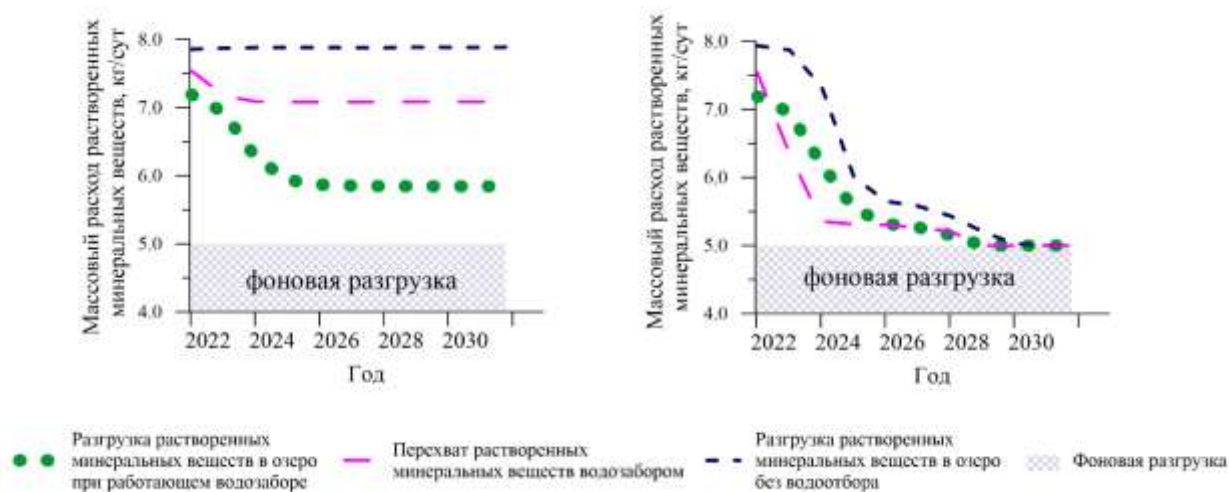


Рисунок 1. Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных нефтепродуктов

Проведенные прогнозные расчеты для двух вариантов реабилитации территории показали (Рисунок 2), что в первой постанковке разгрузка растворенных нефтепродуктов через 10 лет будет выше допустимого значения для байкальской природной территории на порядок, как и при работающем перехватывающем водозаборе, при этом, кумулятивная масса разгрузившихся нефтепродуктов будет ниже на ~15%, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов согласно второй постанковке, показано, что разгрузка растворенных нефтепродуктов в озеро достигнет фонового значения спустя 7 лет, при этом, при функционирующем перехватывающем водозаборе, на два года раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5%, чем в варианте без водоотбора.

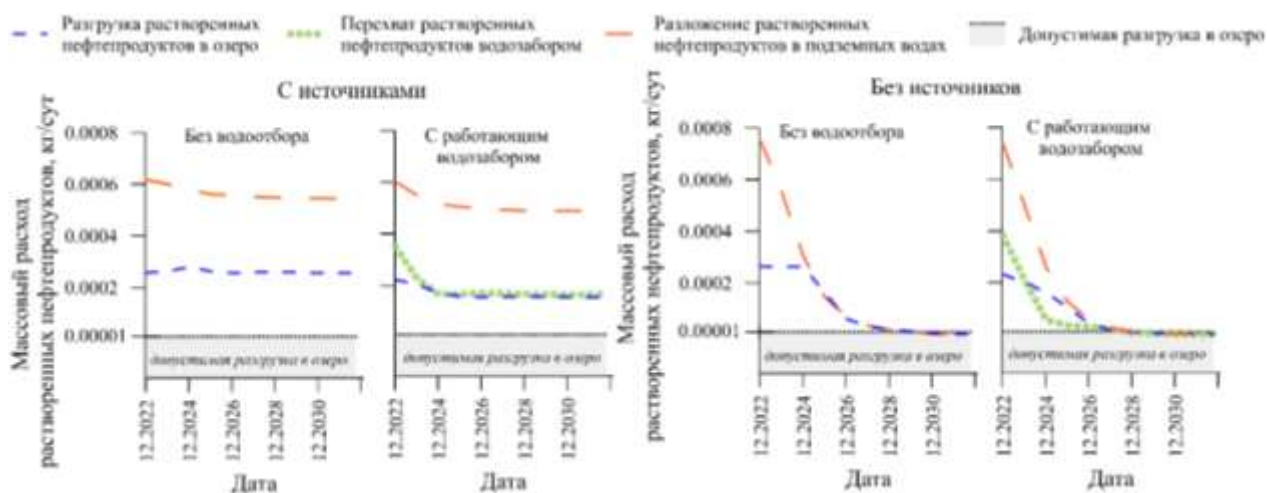


Рисунок 2. Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных нефтепродуктов

Заключение

Разработанная трехмерная геомиграционная модель территории БЦБК, удовлетворительно воспроизводит фактические данные 20-летнего мониторинга по уровням подземных вод, минерализации и содержанию растворенных нефтепродуктов, при калибровке модели установлено положение и режим источников поступления контаминантов в подземные воды.

Прогнозные расчеты для случая невмешательства в техногенную обстановку на территории БЦБК показали, что по истечении 10 лет, разгружающиеся в Байкал подземные воды по минерализации будут превышать фоновые значения примерно на 35%, а по содержанию растворенных нефтепродуктов будут в 15 раз выше допустимых норм для Байкальской природной территории.

Прогнозные расчеты, для условия полного извлечения установленных источников загрязнения, показали, что состав подземных вод, разгружающихся в озеро, будет соответствовать допустимым нормам для Байкальской природной территории спустя восемь лет. Определено, что эксплуатация ранее сооруженных перехватывающих скважин позволит сократить площадь ореолов загрязненных вод, однако время полной очистки подземных вод территории существенно не изменится.

Использованные источники

1. Афолина, Т.Е. Потoki углеводородных соединений в оз. Байкал, процессы их накопления и преобразования в донных осадках : автореф. дис. д-ра. геогр. наук : 25.00.36 / Афолина Татьяна Евгеньевна. – М., 2005. – 36 с.
2. Макаров С.А. Современный морфолитогенез на юге Восточной Сибири : дис. ... докт. геогр. наук : 25.00.25 / Макаров Станислав Александрович. – М., 2016. – 360 с.

3. Расторгуев А.В., Куранов П.Н. Обоснование защиты озера Байкал от загрязнения подземными водами. // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики, Сборник докладов конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН В.А. Мироненко. 2002. С. 141-146.

4. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В. Моделирование миграции растворенных нефтепродуктов в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. // Инженерная геология. 2023. Т. XVIII. № 3. С. 66–78.

5. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В., Курбонов М.Д. Оценка продольной дисперсивности при калибрации моделей тепломассопереноса в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2024. № 4. С. 52–60.

6. Состояние недр Российской Федерации в 2021 году: информ. бюллетень / ФГБУ «Гидроспецгеология». М., 2022. Вып. 45. 120 с. URL: <http://www.gidropspetsgeologia.ru>

7. Шенькман Б.М. Гидрогеохимическая и тепловая техногенные аномалии в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 239-246.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СЛОЖНЫХ МЕРЗЛОТНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Е.Ю. Потапова¹

¹*Московский государственный университет, Москва*

Проблемы прогнозирования изменения гидродинамических условий в процессе эксплуатации месторождений подземных вод имеют большее значение как с точки зрения разнообразия природных условий, так и в связи с увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду [1].

Прогноз изменения гидродинамических условий на водозаборах складывается из оценки источников формирования эксплуатационного водоотбора

Основные факторы, определяющие источники формирования эксплуатационного водоотбора и их динамика зависят от: региональных особенностей расположения месторождения, в том числе от криогенных условий (степень «сплошности» многолетнемерзлых толщ); геолого-гидрогеологических условий, обуславливающих строение водоносных горизонтов, их залегание, литологический состав водовмещающих и слабопроницаемых отложений; условия питания подземных вод, которые также определяются криогенным фактором.

Анализ гидрогеологических условий требует получение информации, необходимой для надежного прогнозирования возможных изменений гидродинамических условий в процессе их эксплуатации [2].

Выделяется ряд вопросов при схематизации природных условий для обоснования прогноза водоотбора, которые включают пространственно-временную модель условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод, геофильтрационную и расчетную модель месторождения.

Важная роль принадлежит гидродинамическим факторам – неоднородность и анизотропность фильтрационных свойств пород, которая в области развития криолитозоны определяется в том числе ее сплошностью.

Основная задача исследований – возможность использования гидродинамической модели для оптимизации расположения имеющихся водозаборных сооружений, а также прогноз наращивания водоотбора на новых водозаборах в условиях общего дефицита подземных вод, обусловленного в том числе и криогенным фактором

Объект исследования расположен в пределах краевой части артезианского бассейна высокого криогенного преобразования, а соответственно гидрогеологические условия (питание и разгрузка) определяются криогенным фактором.

Первый этап исследований для адекватной фильтрационной схематизации состоял в том, что посредством численного анализа карт мощности ММТ, глубины до кровли и мощности целевого водоносного подразделения установлено, что оно полностью нигде не проморожено. Минимальные остаточные не замороженные мощности составляют около 2 м (Рисунок 1).

Величина инфильтрационного питания и его распределение по площади зависит от метеорологических, ландшафтных, почвенных и гидрогеологических условий исследуемого района. Суммарное питание подземных вод равно их разгрузке, так как приходные и расходные статьи баланса за многолетний период должны быть сбалансированы.

Величина инфильтрационного питания задана одинаковой по площади сквозных таликов и постоянной во времени (Рисунок 2).

Для моделирования разгрузки подземных вод (источников, родников) в программной системе предполагается, что расход (дебит) источников пропорционален разнице между абсолютными отметками уровня первого водоносного горизонта и поверхности земли (при условии, что абсолютная отметка уровня выше абсолютной отметки поверхности земли). Зоны потенциальной разгрузки, которые фиксируются по «наледному» (наледи) и родниковому стоку на склонах водоразделов, были заданы по контуру развития талых пород и пересечения их водными объектами (Рисунок 3).

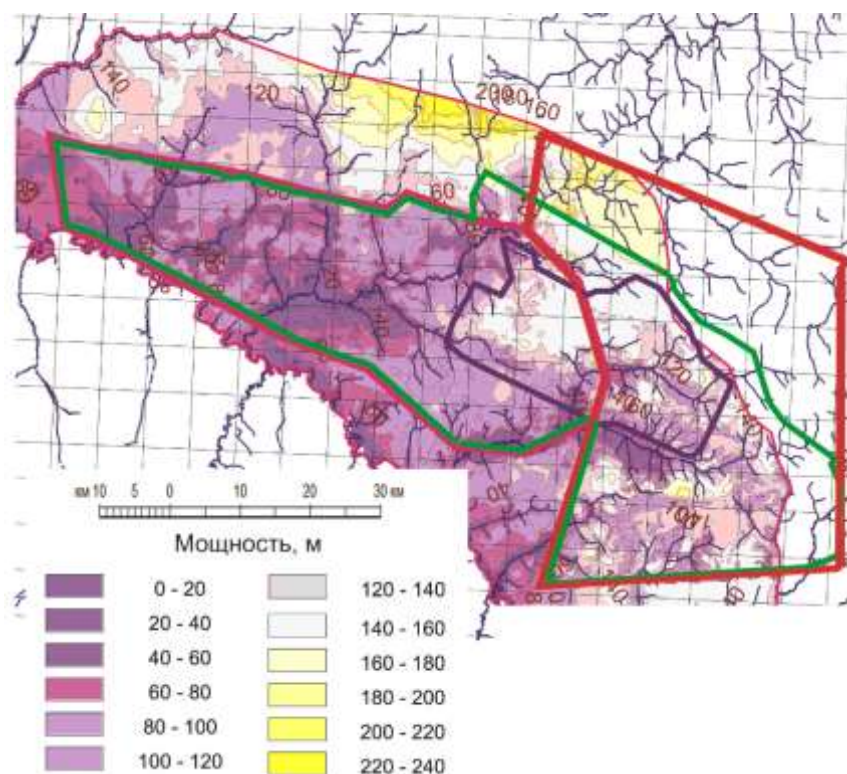


Рисунок 1. Остаточная «непромороженная» мощность расчетного слоя

Далее проводилось решение обратной задачи («калибровка») по воспроизведению динамики водоотбора за 10 лет эксплуатации на основании фактических данных по расходам скважин и статическим уровням.

Соответственно, «калибровка» модели выполнена посредством: решения обратной задачи в стационарной постановке по воспроизведению естественных условий; - решения в нестационарной постановке по воспроизведению водоотбора на 40 стресс периодов. В «калибровке» участвовало 153 значения динамических уровней, величина невязок в большинстве случаев не превышает 5 м, а их распределение имеет симметричный вид, что свидетельствует о достаточном соответствии природным условиям на данную степень изученности.

По результатам моделирования был выполнен анализ балансовой структуры водоотбора (Рисунок 4).

В процессе исследований были существенно уточнены конфигурации распространения многолетней мерзлоты в пределах территории исследования.

На калибровку модели изменение конфигурации распространения многолетней мерзлоты сказались минимальным образом, но балансовая структура водоотбора неожиданно изменилась радикально (Рисунок 5), сделалась практически «абсурдной», что потребовало изменения величины инфильтрационного питания на 30%, а кроме того, претерпела изменение параметры родниковой разгрузки.

В заключении следует отметить следующее:

1. высокую неоднозначность модели, которая отражается в исключительной сложности гидрогеологических условий, обусловленных и мерзлотным фактором;
2. мерзлотный фактор находит отражение в питании подземных вод, которое происходит только по зонам сквозных инсоляционных таликов, а также в разгрузке, которая происходит по границам «мерзлых островов»;
3. мерзлотный фактор в существенной степени определяет связь подземных и поверхностных вод, в основном все долины мелких рек заморожены, участие поверхностных вод в балансе происходит только в области развития таликов;
4. мерзлотный фактор проявляется в фильтрационных свойствах водовмещающих пород, зачатую благодаря наличию ММТ остаточная мощность водоносного подразделения составляет 2-5 м.

Наличие многолетней мерзлоты долинного типа осложняет формирование потока. Следует отметить, что информация крайне противоречивая и степень ее полноты по скважинам значительно различается.

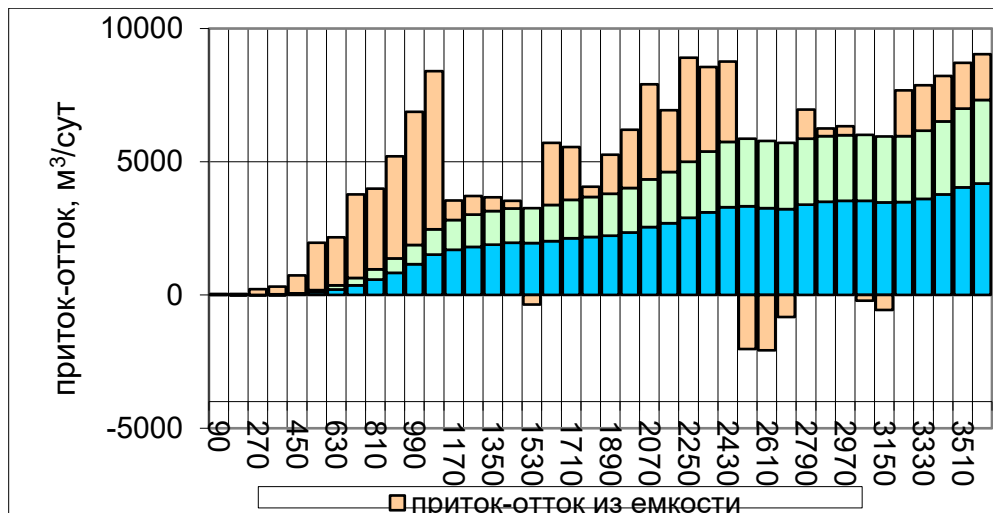


Рисунок 4. Балансовая структура водоотбора при «первоначальной» конфигурации многолетней мерзлоты

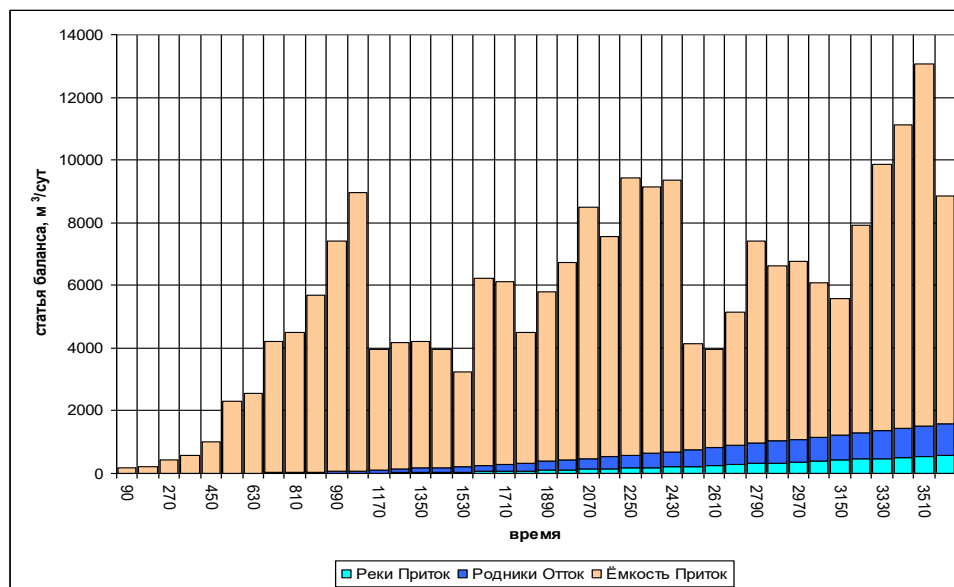


Рисунок 5. Балансовая структура водоотбора при «уточненной» конфигурации многолетней мерзлоты

Использованные источники

1. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. – М.: Недра, 1973.
2. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. – Новосибирск: Наука, 1974
3. Максимов В.М. Справочное руководство гидрогеолога. Т.1. – М: Недра, 1979.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА КРИОГЕННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ДЛЯ ВОД РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

А.А. Шиманов¹, И.А. Комаров², Т.А. Киреева², Н.А. Павлова³

¹ГПБУ «Мосэкомониторинг», Москва

²Московский государственный университет, Москва

³Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова СО РАН, Якутск

В работе рассматривается сопоставление процессов криометаморфизма для вод различного химического состава на примере криопэгов полуострова Ямал и города Якутска. Химический состав рассматриваемых криопэгов приведен в работах [1, 5, 7]. Засоленность грунтов Ямала вызвана трансгрессией и регрессией моря. Подобный тип засоления называется морским, т.к. исходным раствором для последующего концентрирования является морская вода. Для грунтов города Якутска характерно континентальное засоление вследствие испарения пресных поверхностных и подземных вод. Разница в исходном составе концентрирующихся вод обуславливает разницу составов формирующихся криопэгов. Однако концентрирование некоторых ионов являются схожими для обоих типов засоления грунтов.

В криопэгах морского и континентального типа засоления происходит накопление ионов Na^+ и Cl^- , что связано с высокой растворимостью их солей. Большее накопление ионов Na^+ и Cl^- в криопэгах морского типа засоления вызвано более высоким содержанием этих ионов в исходно концентрируемой морской воде, по отношению к водам континентального генезиса г. Якутска.

В криопэгах морского и континентального типа засоления ион Ca^{2+} проявил разную способность к накоплению в растворе. В морских криопэгах данный ион преимущественно не накапливается. При этом встречаются отдельные образцы с высоким содержанием иона Ca^{2+} . В криопэгах Якутска Ca^{2+} накапливается до минерализации 15 г/л, что, вероятно, связано с накоплением хлорида и нитрата кальция.

Ион Mg^{2+} накапливается в криопэгах морского и континентального типов засоления. Его содержание показывает сильную корреляцию с минерализацией криопэга. Накопление иона Mg^{2+} происходит в составе солей MgSO_4 и MgCl_2 , чему способствует накопление в криопэгах соответствующих анионов. Особенно это относится к накоплению MgSO_4 , который остается в растворе при более низких температурах, чем даже Na_2SO_4 , что связано с более высокой растворимостью MgSO_4 , чем Na_2SO_4 (351 и 192 г/л соответственно при ст. усл).

Гидрокарбонат ион не накапливается в криопэгах морского и континентального типов засоления, что связано с низкой растворимостью гидрокарбоната кальция, т.е. осаждением его ионом Ca^{2+} . При этом наблюдается большее содержание гидрокарбонат иона в криопэгах континентального типа засоления, по сравнению с морским типом, что вызвано начальным гидрокарбонатно-натриевым составом концентрируемых вод.

Наибольшее различие в закономерностях накопления ионов для криопэгов различного типа засоления показал сульфат ион. В криопэгах континентального типа засоления наблюдается очень сильная корреляция между содержанием данного иона и минерализацией криопэга, в то время как для криопэгов морского типа засоления корреляция слабая. Причиной сохранения сульфат иона в растворе является накопление в виде растворенного гидратированного сульфата магния ($Mg_2SO_4 \cdot 12H_2O$), который остается в растворе до температуры $-5^{\circ}C$, что ниже обычных значений грунтового массива.

Важной особенностью криопэгов континентального типа засоления является накопление в них иона NO_3^- . Несмотря на небольшие содержания нитрат иона при температурах до $-3,0^{\circ}C$ способность криопэгов к его накоплению позволяет прогнозировать формирование криопэгов, в которых нитрат ион станет вторым по значимости в мг-экв % среди анионов. Формирование подобных рассолов объясняется его исходным значительным содержанием в водах континентального генезиса и почти полным отсутствием в морских водах [Киреева, 2016].

Для оценки изменения содержания иона NO_3^- в мг-экв % был проведен термодинамический расчет в программном комплексе FREEZBRINE на основании данных о химическом составе криопэгов города Якутска. Расчет проводился в диапазоне температур от $0,0$ до $-40^{\circ}C$. Результаты расчета, приведенные на Рисунок 1.

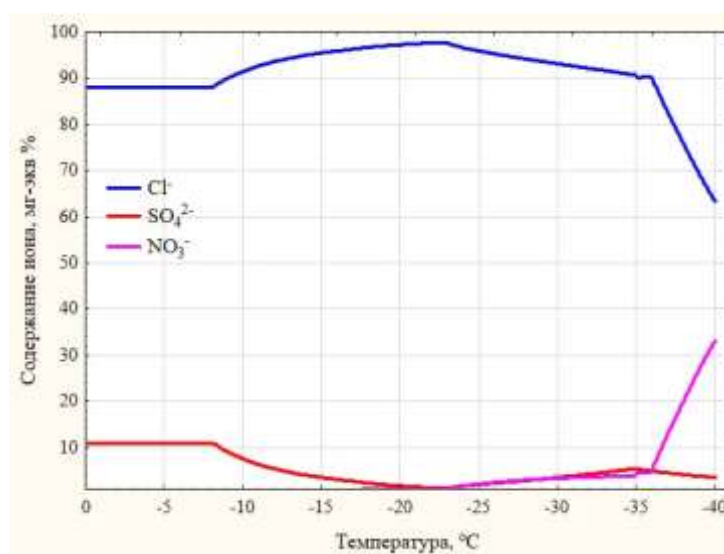


Рисунок 1. Анионный состав криопэгов континентального типа засоления в мг-экв % в диапазоне температур от 0 до $-40^{\circ}C$.

Содержание нитрат иона в 10 мг-экв. % сохраняется стабильным до температуры $-10^{\circ}C$, что очень значительно, и начинает расти при понижении температуры ниже $-35^{\circ}C$, когда начинается кристаллизация $CaCl_2$, уводящая Cl -ион из раствора. Достаточно быстро содержание нитрат иона в мг-экв. % достигает значений, превышающих содержание сульфат иона. При

температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ содержание нитрат иона превышает 30 мг-экв. %. В природе это редко достигается, но существование такой возможности интересно.

Использованные источники

1. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 189 с.

2. Еловская Л.Г., Коноровский А.К., Саввинов Д.Д. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. Москва: Наука, 1966, 274 с.

3. Комаров И.А., Мироненко М.В., Никитин К.А., Кияшко Н.В. Методика прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных мерзлых пород п-ова Ямал, с учетом глобального изменения климата. М.: ООО Доктормедиа, 2024, 160 с.

4. Киреева Т.А. Гидрогеохимия. М.: Сайт геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2016, с.197.

5. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. - Научный мир, Москва, 2010.

6. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений центрального Ямала // Криосфера Земли. -2002. -Т. 6. №3. -С. 15–24.

7. Шиманов А.А., Комаров И.А., Киреева Т.А. Особенности изменения химического состава криопэгов полуострова Ямал в процессе криогенного концентрирования //Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), 2019. № 6. С. 73-80.

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА В СВОБОДНОЙ, ПОРОВОЙ И СВЯЗАННОЙ ВОДЕ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ КЕРЧЕНСКО-ТАМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.А. Харитонова¹, Е.С. Казак¹, Г.А. Челноков², А.В. Ермаков², В.Ю. Лаврушин²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Геологический институт ГИН РАН, Москва

В работе представлены изотопные характеристики $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ и δD различных типов вод, экстрагированных из глинистой пульпы вулканов южной части Западно-Кубанского прогиба. В течение полевого сезона 2024 г. из 22 вулканов Керченско-Таманской области были отобраны образцы глинистой пульпы. После суток отстаивания осевшая фракция была отфильтрована через мембранный фильтр 0,45 мкм для получения глинистой субстанции. Полученные образцы были герметично упакованы в несколько полиэтиленовых пакетов и хранились в лаборатории в прохладном месте. Минеральная глинистая субстанция была изучена методами рентгенофазового анализа.

Пробы свободной (пластовой) воды после отстаивания были отобраны в пластиковые емкости по 10 мл без фильтрации. Выделение поровой и физически-связанной водных фаз выполнялось методом испарения на устройстве для анализа водосодержания УДАВ 1.2-5. Выделение воды из образцов пород проводилось при температурах 105 и 350 °С в течение пяти часов. Относительная ошибка определения не превышала 5 отн.% [3].

Определение изотопного состава природных вод ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$ и δD) выполнялось на изотопном анализаторе воды (Picarro, США) в ГИН РАН. Результаты измерений $\delta^{18}\text{O}$ и δD приведены относительно международного стандарта VSMOW.

Полученные результаты представлены в Таблице 1. Пластовая вода проявляет «тяжелый» изотопный состав: $\delta^{17}\text{O}$ находится в диапазоне значений $-0.52 \div +5.88$ ‰, $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от -0.97 до $+13.19$ ‰, а δD от -31.3 до -5.8 ‰. Наиболее тяжелый изотопный состав по $\delta^{18}\text{O}$ ($> +13$ ‰) демонстрируют воды вулканов Борух-Оба, Трубецкого, Булганакский очаг и Андрусова, а по $\delta^{17}\text{O}$ ($> +7$ ‰) воды вулканов Ахтанизовский, Еникальский, Булганакский очаг, Борух-Оба и Трубецкого. Аномально тяжелый дейтерий (> -15.0 ‰) выявлен в водах вулканов Бурашский, Андрусова, Гладковский и Борух-Оба. Наиболее «изотопно-легкими» являются воды вулканов Сююрташский и Насырский. Наиболее легкие значения $\delta^{18}\text{O}$ характерны для вулканов имеющих связь с подземными водами морского генезиса, а наиболее тяжелые – для вулканов, подвергшихся процессу значительного испарительного концентрирования.

По сравнению с локальными атмосферными и морскими водами, в свободных водах вулканов наблюдается ярко выраженное обогащение $\delta^{18}\text{O}$ (до $+17,1$ ‰) и незначительный дефицит δD (до -20 ‰), что сдвигает фигуративные точки вправо от глобальной линии метеорных вод.

Многие вулканы (Борух-Оба, Андрусова, Ахтанизовский, Еникальский, Булганакский очаг и Трубецкого) проявляют значительные сдвиг вправо с $\Delta^{18}\text{O} > +15\%$. Этот сдвиг может быть обусловлен изотопным обменом между водой и кислородсодержащими фазами грязевулканического субстрата. Наибольший сдвиг по кислороду фиксируется в вулканах с температурой прогрева более 90 °С.

В эксперименте, при прогреве глинистой фракции до 90–105 °С, из образцов начинает выделяться межслоевая и поверхностно-адсорбированная вода. Масса выделившейся воды в образцах сильно варьирует от 1,37 до 14,7 г, и видимо, регулируется минеральным составом и исходной влажностью. Изотопный состав межслоевой воды неоднороден, изменяется в диапазоне от –34,8 до –10,9 ‰ для δD , и от –1,87 до +12,62 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$. На диаграмме в координатах δD – $\delta^{18}\text{O}$ тренд изменения изотопного состава воды этого типа практически идентичен профилю для жидких вод грязевых вулканов. Вероятно, межслоевые рыхлосвязанные воды вносят значительный вклад в общий баланс водной компоненты грязевых вулканов, кроме того, идентичный тренд предполагает значительный прогрев воды в вулканах при ее погружении, как минимум до 120–140 °С. Расчет температуры прогрева грязевулканических вод, выполненный на основе Mg–Li геотермометра, дает температурный диапазон 47–138 °С.

Таблица 1. Изотопный состав изученных проб, ‰

Название вулкана	Свободная вода			Вода, экстрагированная при 105 °С			Вода, экстрагированная при 350 °С		
	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Кучугурский	1,82	3,44	-28,8	0,63	1,43	-25,48	4,15	8,01	7,66
Ахтанизовский	6,53	12,43	-22,0	1,71	3,29	-17,63	4,67	8,64	5,95
Цымбалы западная	3,98	7,57	-22,3	3,43	6,66	-29,44	6,52	12,60	1,40
Семигорская скважина	5,14	9,78	-18,5	4,05	8,01	-23,97	7,25	13,99	6,56
Семигорский	5,54	10,56	-20,2	6,54	12,62	-10,93	10,06	19,16	21,13
Школьный	3,58	6,82	-17,4	3,40	6,63	-16,91	8,28	15,60	26,15
Гладковский	3,44	6,55	-9,3	3,06	5,91	-10,94	6,25	11,92	17,32
Шуго	5,49	10,44	-18,0	4,06	7,86	-24,79	7,31	14,15	8,02
Бугазский	4,77	9,09	-22,8	3,38	6,54	-32,53	7,67	14,71	6,55
Карabetова гора	5,88	11,20	-18,7	4,28	8,39	-26,54	6,95	13,42	-1,30
Гнилая сопка (Гефест)	1,25	2,36	-31,3	0,56	1,15	-34,51	3,77	7,47	-3,78
Сююрташский	-0,52	-0,97	-27,6	0,28	0,41	-27,50	14,90	15,95	29,51
Еникальский	6,56	12,48	-23,0	5,30	10,19	-29,09	9,35	17,71	8,58
Андрусова	5,29	13,50	-10	5,29	10,14	-13,05	8,80	16,77	17,80
Булганакский очаг	6,84	13,01	-21,7	5,04	9,71	-15,58	7,81	14,95	10,41
Трубецкого	6,93	13,19	-21,7	5,36	10,31	-28,47	8,09	15,44	-3,10
Владиславовский	1,60	3,05	-22,5	1,24	2,45	-28,46	4,61	8,88	1,55
Арма-Эли, сальза 1	2,26	4,32	-25,3	0,59	1,25	-34,82	3,97	7,69	-3,86
Насырский	-0,28	-0,53	-19,8	-1,08	-1,87	-27,86	2,20	4,06	1,17

Борух-Оба	6,86	13,09	-5,8	4,94	9,55	-16,36	7,90	14,91	10,11
Бурашский	4,19	7,95	-14,4	3,16	6,12	-25,63	6,82	13,14	7,12

Вариации δD в пробах межслоевой/адсорбционной воды, выделившейся при 105 °С показывают два разнонаправленных тренда (Рисунок 1): в первом случае наблюдается увеличение значения δD при нагревании, а во втором проявляется отчетливый дефицит δD (>10‰) Мы считаем, что уровень облегчения δD в образце зависит от количества адсорбционной воды в глинистых фазах или наличия в образце гипса.

Изотопный состав вод, выделенных при температуре 105 °С, близок к водам, полученным просто при оттаивании грязевулканической субстанции (без прогрева). В то время как воды, извлеченные при 350 °С, демонстрируют отчетливое утяжеление по дейтерию. Линия тренда $\delta D - \delta^{18}O$ указывает на существование испарительного концентрирования при увеличении температуры. При гипотетической трансформации смектита (содержащего до 25 мас.% кристаллизационной воды) в иллит выделяющаяся вода должна была бы облегчаться по δD , что согласуется с литературными данными [1; 2; 4]. Однако в нашем случае фиксируется не облегчение, а утяжеление воды по дейтерию, что указывает на испарительное фракционирование. Рентгенофазовый анализ прокаленной (до 350 °С) глинистой пульпы не выявил структурной перестройки смектита.

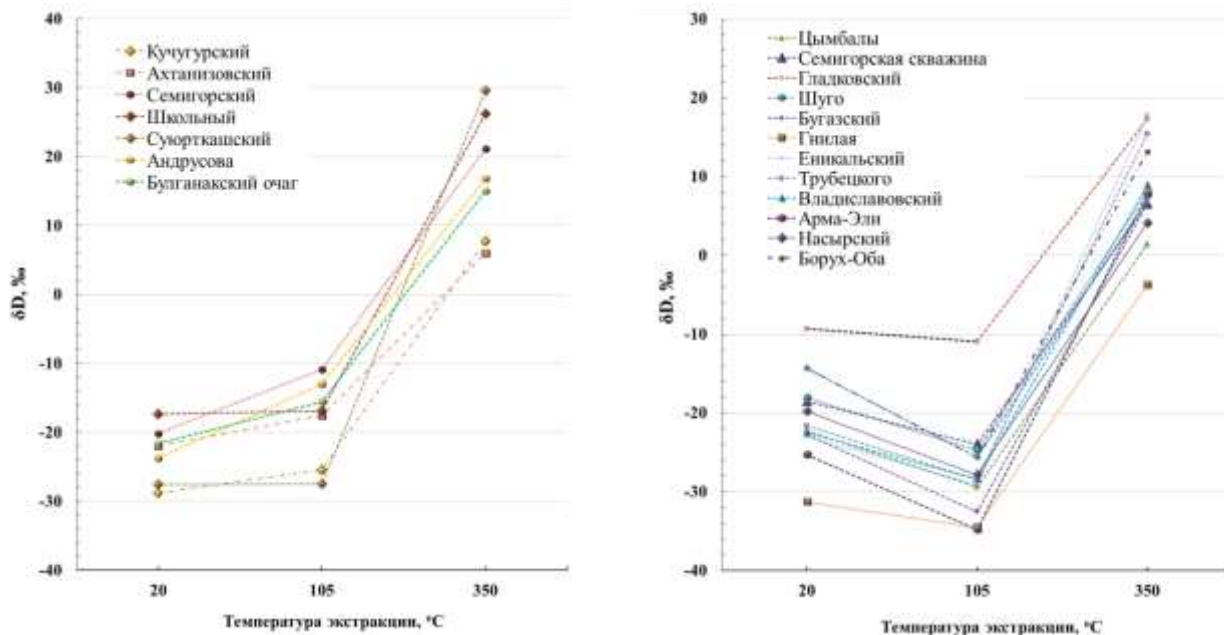


Рисунок 1. Вариации изменения содержания дейтерия в пробах рыхлосвязанной воды, экстрагированной при 105 °С

В грязевулканических водах установлена тесная корреляционная связь между содержанием молекул $H_2^{18}O$ и $H_2^{17}O$. Линия регрессии, аппроксимирующая значения функции

$\delta^{17}\text{O}(\delta^{18}\text{O})$ в свободных жидких водах вулканов, имеет значение 0,527, что близко к значению природных вод (0,528), в то время как в межслоевой рыхлосвязанной воде ее наклон составляет 0,521. Наблюдается практически прямая корреляция между параметрами $\Delta^{17}\text{O}_{\text{ex}}$ и D- ex . Вода, экстрагированная при 350 °С, характеризуется высокой дисперсией по показателю $\Delta^{17}\text{O}_{\text{ex}}$: в одних вулканах фиксируются резко отрицательные значения, в других — положительные. Наклон линии регрессии $\delta^{17}\text{O}(\delta^{18}\text{O})$ для этой фракции возрастает до 0,525, а положительная корреляция между $\Delta^{17}\text{O}_{\text{ex}}$ и D- ex сохраняется. Таким образом, изотопный состав кислорода в исследованных водах свидетельствует о различных условиях их формирования, включая температуру и влажность среды.

Заключение

Изотопные характеристики изученных вод указывают на их различное происхождение, позволяя выделить три возможных неравнозначных источника воды в грязевулканических фракциях: морские воды современного или палеовозраста, локальные атмосферные осадки и рыхлосвязанную межслоевую/адсорбированную воду глинистых минералов. Исходно морские воды, проникая на глубину 1–3 км претерпевают изотопное фракционирование в результате подземного испарения, что способствует накоплению в грязевулканическом очаге воды с более тяжелым изотопным составом по $\delta^{18}\text{O}$ и δD . На текущем этапе исследований значимого вклада структурных гидроксильных групп, высвобождающихся при трансформации смектита, не выявлено.

Использованные источники

1. Селецкий Ю.Б. Дегидратация глин как возможный фактор формирования изотопного состава глубоких подземных вод // Водные ресурсы. 1978. № 3. С. 148–152.
2. Kanik N. J., Longstaffe F. J., Kuligiewicz A., Derkowski A. Systematics of smectite hydrogen-isotope composition: Structural hydrogen versus adsorbed water // Applied Clay Science 216 (2022) 106338 <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106338>
3. Kazak E. S., Kazak A. V. A novel laboratory method for reliable water content determination of shale reservoir rocks, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, T. 106301.
4. Whittaker M. L., Shoaib M., Lammers L.N. et al. Smectite phase separation is driven by hydration-mediated interfacial charge // J. Colloid Interface Sci. 2023. 647. 406–420. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.05.085>

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРОЕКТИРУЕМОГО ПРИРЕЧНОГО ВОДОЗАБОРА АНДРЕЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. А. Маслов¹

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва*

Все время разведки и оценки запасов (1962-2023 гг.) водовмещающие отложения подготовленного к введению в промышленную эксплуатацию Андреевского месторождения содержат воду, практически полностью соответствующую предъявляемым требованиям, за исключением небольшого превышения по содержанию железа суммарного и мутности, что легко устраняется безреагентной водоподготовкой. При эксплуатации доля поверхностных вод реки Ока в обеспечении баланса эксплуатационного водоотбора прогнозируется более 75%, а формирование депрессии напоров интенсифицирует подток низзалегających подземных вод с высоким содержанием ряда компонентов, в том числе жесткости общей, превышающей нормативы в несколько раз. Таким образом исследование особенностей формирования качества подземных вод проектируемого приречного водозабора Андреевского месторождения является актуальной задачей, решение которой необходимо на этапе проектирования водозабора для обеспечения необходимой и достаточной системы водоподготовки.

Особенностью многолетних изменений химического состава поверхностных вод реки Ока является периодическое временное превышение нормативов питьевых по ряду показателей общего солевого состава, в том числе и общей жесткости (Рисунок 1).

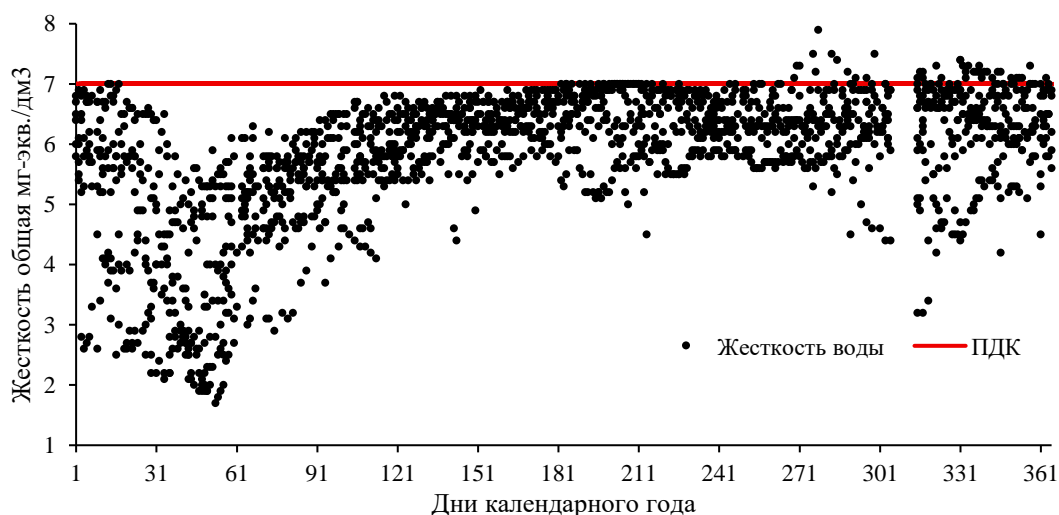


Рисунок 1. Внутригодовое распределение жесткости в реке Ока за период 2006-2024 гг.

При обосновании плана подсчета эксплуатационных запасов пресных подземных вод Андреевского месторождения в 2024 г. учтена вся накопленная гидрогеологическая изученность месторождения, начиная с поисковой стадии 1962-1975 гг., стадии предварительной разведки 1981-1985 гг. и стадии детальной разведки 1993 г., а также региональные обобщения,

выполненные в 2010 г. при обосновании региональной гидрогеодинамической модели Калужской области в целом.

Расчеты выполнены методом математического моделирования, обусловленным сложностью геолого-гидрогеологических условий Андреевского месторождения подземных вод. Выполнена фильтрационная схематизация, включающая пространственную структуру потока, распределение параметров водовмещающих отложений и задание краевых условий.

Поток подземных вод по водоносным горизонтам (окско-тарусскому, нижнетульскому, упинскому) имеет основное направление в сторону региональной дрены территории р. Ока. На водораздельных пространствах формируются условия для нисходящей фильтрации, а в пределах долины р. Ока формируется разгрузка потока подземных вод путем восходящего перетекания. Гидрогеодинамическое взаимодействие смежных водоносных горизонтов неравномерно по площади, что связано со сложным строением разделяющих слабопроницаемых отложений как верхнетульского, так и бобриковского возраста. Гидрогеологические условия территории также осложняются наличием погребенных долин р. Ока разного возраста. Древняя долина р. Оки, сформировавшаяся в предчетвертичное время, выполнена песками, супесями, суглинками четвертичного периода различного генезиса (Рисунок 2). Погребенная долина средневизейского возраста заполнена преимущественно светло-серыми хорошо сортированными песками, которые формируют нижнетульский водоносный горизонт.

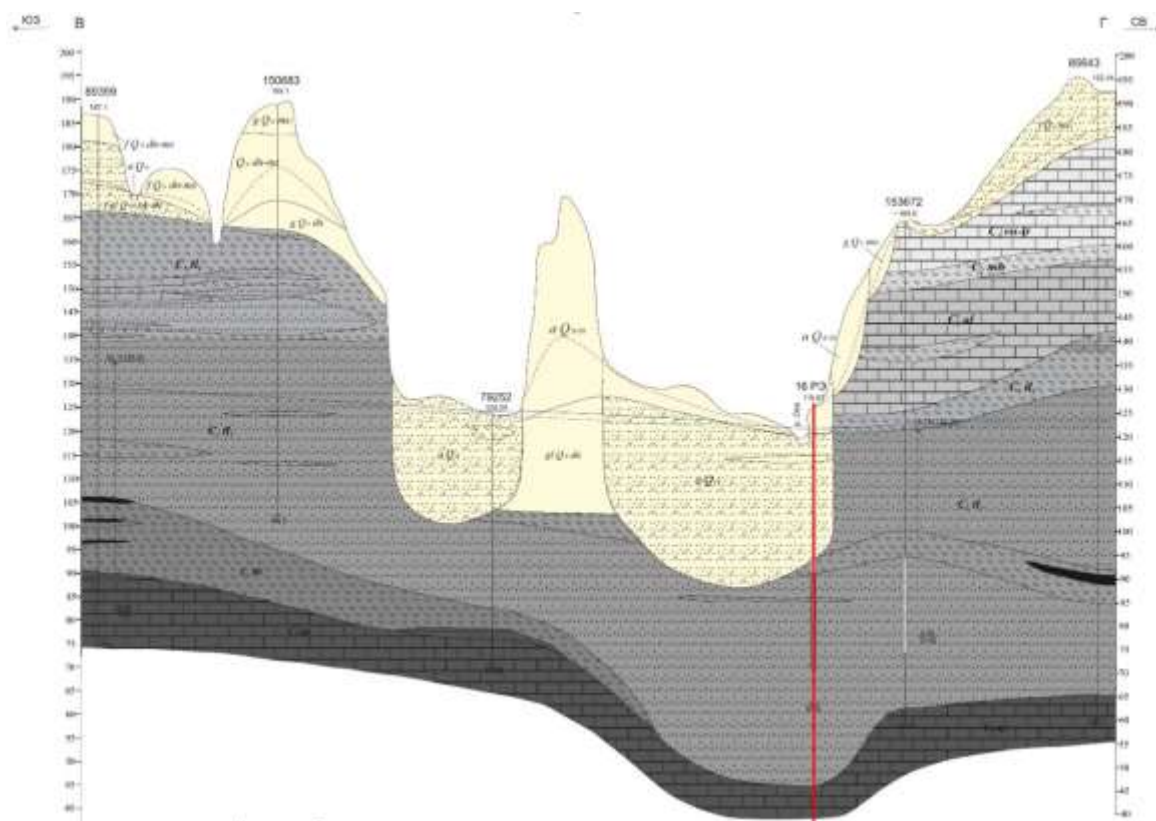


Рисунок 2. Гидрогеологический разрез вкрест долины реки Ока, проходящий через центральную скважину проектируемого водозаборного ряда (красной линией обозначен водозаборный ряд)

На Андреевском месторождении проектируется водозаборный ряд, состоящий из 31 эксплуатационной скважины, длиной $\approx 2\ 400$ м, расположенный на правом берегу р. Оки в 100 м от уреза воды (для условий 95% вероятности превышения). Проектируются разведочно-эксплуатационные скважины однотипной конструкции, расположенные в створе проектного ряда на расстоянии ≈ 80 м друг от друга, оборудованные водоприемным интервалом на водовмещающие отложения совмещенного аллювиально-нижнетульского водоносного комплекса и подготовленные к эксплуатации с дебитом $3\ 500\ \text{м}^3/\text{сут}$ каждая.

Прогнозные расчеты проведены на откалиброванной модели решением задачи в полных напорах в стационарной постановке, расчетное время работы водозабора составляет 10 000 суток. В прогнозных расчетах принят напор поверхностных вод, полученный по результатам специальных гидрологических работ. В качестве внутригодового распределения уровней воды (по декадам) 95% обеспеченности рекомендовано использование расчетного распределения, полученного с использованием 1996/97 водохозяйственного года аналога. Принятое расчетное значение напора реки Ока в районе середины проектного скважинного ряда 116,95 м соответствует минимальному значению рекомендуемого расчетного распределения (третья декада августа). С учетом уклона водной поверхности реки порядка 9×10^{-5} , полученного в результате проведенных гидрологических работ, на входе в модельное поле напор р. Ока равен 117,58 м, на выходе 115,85 м.

Полученные прогнозные решения позволили оценить балансовую структуру запасов подземных вод и дать прогноз смешения подземных и поверхностных вод. Так, эксплуатационный водоотбор обеспечен естественными ресурсами подземных вод в количестве $25\ 127,5\ \text{м}^3/\text{сут}$, что составляет 23% от величины эксплуатационного водоотбора ($108\ 000\ \text{м}^3/\text{сут}$) и привлекаемыми ресурсами поверхностных вод в количестве $82\ 874,5\ \text{м}^3/\text{сут}$, что составляет 77% от величины эксплуатационного водоотбора. Увеличение притока подземных вод упинского водоносного горизонта при развитии эксплуатационной депрессии напоров в продуктивный аллювиально-нижнетульский водоносный комплекс на $5\ 010,5\ \text{м}^3/\text{сут}$ позволяет оценить долю подземных вод упинского водоносного горизонта в общем балансе эксплуатационного водоотбора в 4,64% - $5\ 010,5/108\ 000$.

Полученное соотношение используется при расчете смешения подземных вод совмещенного аллювиально-нижнетульского водоносного комплекса, привлекаемых поверхностных вод реки Оки и привлекаемых подземных вод упинского водоносного горизонта. В качестве основного компонента состава подземных и поверхностных вод и, соответственно, в добываемой смеси, рассматривается жесткость общая, что обусловлено тем, что это единственный показатель, содержание которого регулярно превышает нормативы в речной воде и упинском водоносном горизонте.

Фактические содержания жесткости общей в речных водах в створе городского водозабора г. Калуги за период 2008-2023 гг. обнаруживают (Рисунок 1), как существенное снижение в период половодья – до 2 мг-экв./дм³ и менее, так и повышение в период межени, достигающее 7 мг-экв./дм³ и более. Результаты проведенных расчетов показывают, что есть вероятность достаточно продолжительного – 2 периода до 30-40 суток и один порядка 10-20 суток превышения жесткости общей в добываемых подземных водах – до 7,08 мг-экв./дм³, что формально требует водоподготовки и должно быть учтено при проектировании Андреевского водозабора.

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД И ДОННЫХ ОСАДКОВ В ЗОНЕ РАЗГРУЗКИ МЕТАНА В КАРСКОМ МОРЕ

А.В. Ермаков^{1,2}

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

²*Геологический институт ГИН РАН, Москва*

Разгрузка метана – явление, широко распространенное явление на шельфах северных морей. Масштабы проявлений этого процесса варьируются от рассредоточенных разгрузок и отдельных выходов, заметных только по появлению звукорассеивающих объектов в водной толще (т.н. «факелы» пузырьков газа), до крупных полей специфичных форм рельефа. Разгрузка метана оказывает существенное влияние на геохимический облик донных осадков и поровых вод (формирование переходных сульфат-метановых зон, газовых гидратов, аутигенных карбонатов и т.д.). В Карском море признаки разгрузки метана зафиксированы неоднократно. Исследование геохимии осадков представляет интерес также с целью выявления взаимного влияния дегазации и оледенений, которым подвергался этот регион.

В ходе научных рейсов на НИС «Академик Николай Страхов» (АНС) сотрудниками Геологического института в юго-западной части Карского моря были закартированы крупные депрессии: предположительно, затопленные в ходе голоценовой трансгрессии палеодолины рек. В 52 рейсе АНС в одной из палеодолин с поверхности террасовидной площадки в восточном борту с глубины -112м, на участке выявленной разгрузки (Мороз и др., 2025) была отобрана колонка осадков. Из рабочей половины колонки методом «субкоринга» был отобран полный разрез (7 секций общей мощностью 3,35м). Были измерены петрофизические свойства осадков (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, влажность, магнитная восприимчивость), исследованы гранулометрический состав, карбонатность, содержание органического вещества. Из секций керна были отобраны образцы для центрифугирования; в выделившейся поровой воде были определены отношения стабильных изотопов кислорода и водорода. В 10 пробах воды также был определен состав макрокомпонентов методом капиллярного электрофореза. Химический состав осадков был исследован рентгенофлуоресцентным методом (XRF). Литологический состав осадков более подробно обсуждается в статье (Мороз и др., 2025). Важными особенностями являются: 1) преобладающий алевритовый состав осадков (55-80%), содержание глин лишь в нижней части достигает 25%, в верхней половине колонки имеются два небольших песчаных прослоя; 2) в средней части колонки в судовой лаборатории был обнаружен кристалл икаита размерами 6х2х2 см; 3) карбонатность имеет два максимума в верхней и нижней третях колонки и варьируется от 4 до 15%.

Результаты XRF анализа (концентрации элементов, выраженные в ppm) сопоставлялись нами с химическим составом поровых вод. Для выделения интервалов в разрезе использовалось отношение Ti/K: считается, что для морских осадков оно отражает интенсивность выветривания в источниках материала и преобладающий тип (физическое – при высоких значениях отношения, химическое – при низких). В разрезе можно выделить два максимума отношения: выше 1,1 и ниже 2,5 м; распределение по разрезу приблизительно соответствует поведению карбонатности. Обратную картину демонстрирует концентрация фосфора – максимумам Ti/K и карбонатности соответствуют минимальные его содержания, и наоборот. Кроме того, в среднем интервале, где был получен кристалл икаита выявлен локальный минимум среди высоких значений концентрации фосфора, вероятно минимум концентрации и определил место формирования икаита, так как известно, что фосфаты могут ингибировать осаждение карбонатов. Интересно распределение серы и кальция – на графике точки концентраций ложатся на прямую с угловым коэффициентом 0,94 и коэффициентом корреляции выше 0,97. При общем росте концентраций S и Ca от ~0,1% до ~2% вниз по разрезу, выделяются отдельные узкие пики, превышающие фоновые значения в 2-3 раза. Предположительно, минеральный состав представлен аутигенным гипсом, образование которого может быть связано с перемещением вверх сульфатно-метановой транзитной зоны при накоплении новых порций осадка.

В составе макрокомпонентов поровых вод преобладают Na⁺ и Cl⁻, рассчитанная по хлору соленость составляет от 30 до 40 ‰, лишь в узком интервале в нижней части колонки опускаясь до 23 ‰; минерализация по сумме катионов и анионов составляет от 30 до 54 г/л. В распределении концентраций ионов наблюдается сходная картина: максимальные значения приурочены к тем же глубинам разреза, на которых выделяются максимумы Ti/K и карбонатности и минимумы P. Концентрации ионов в общем существенно выше типичных морских значений, например, сульфат достигает значений 12 г/л (!). Состав скорее близок к замкнутым бассейнам, испытывающим периодическое разбавление и концентрирование.

Использованные источники

1. Мороз Е.А., Еременко Е.А., Ермаков А.В., Денисова А.П., Драздова А.В., Ананьев Р.А., Архипов В.В., Мазнев С.В. Литологический состав донных осадков в районе разгрузки флюидов в Карском море // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2025. – Т. 523. – № 2. С. 197-203.

НОВОЕ В СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ К ГЕОСФЕРАМ:
ОТ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПОДЗЕМНОГО СТОКА
ДО ГРАВИТАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Б.А. Шагин¹

¹*Американский гидрологический институт*

Новая концепция на подтвержденной модельно стадии, обеспечивающее начало полноценной разработки области науки о взаимодействии геосфер под влиянием динамики гравитации в околоземном пространстве Солнечной системы. Это междисциплинарный взгляд на геофизику, который переводит изучение земных процессов из изолированной системы в контекст небесной механики и анализа многомерных данных.

Концепция

В философии концепция (от лат. *conceptio* «система понимания») — это целостная система взаимосвязанных взглядов, идей и принципов, объединенных вокруг фундаментальной мысли для объяснения явлений или процессов. Это не просто набор фактов, а теоретический каркас, задающий способ понимания реальности. В ее основе всегда лежит базовая идея или «руководящий принцип». Она служит инструментом для интерпретации того, как устроен мир, общество или познание.

В современной философии (особенно в постмодернизме, например, у Жюль Делеза) часто проводят различие: Концепт — это творческий акт мышления, «интенсивное» смысловое зерно, которое не всегда стремится к строгой логической завершенности. В отличие от концепта — базовой смысловой единицы или «кирпичика» мысли — концепция представляет собой логически оформленную структуру, которая позволяет выстроить стратегию мышления или исследования.

Таким образом, если концепты — это «острова смысла», то концепция — это «карта», связывающая эти острова в осмысленный маршрут (<https://iphlib.ru/library>).

Методика моделирования для подтверждения концепции

В начале XX века Анри Пуанкаре доказал, что задача трех тел не имеет общего аналитического решения, заложив основы теории хаоса. Это означало, что долгосрочное поведение планет невозможно точно спрогнозировать.

Теория КАМ (Колмогорова-Арнольда-Мозера): В 1950-60-х годах она показала, что большинство орбит остаются квазипериодическими (стабильными) при малых возмущениях, но не гарантировала вечную устойчивость.

Компьютерное моделирование: К концу XX века численное моделирование (например, Джеральд Сассман, Жак Ласкар) выявило, что орбиты планет, особенно внутренних, хаотичны...

Роль масс: Гравитационное влияние Юпитера, как «архитектора», является определяющим, стабилизируя пояс астероидов, но при этом делая систему чувствительной к малым изменениям (naukatv.ru).

Метрика расстояний: В этом пространстве сложные гравитационные взаимодействия, которые в 3D-мире выглядят хаотично, могут быть представлены как линейные векторы. Гильбертово пространство: Позволяет применять аппарат линейной алгебры для предсказания динамики системы. Мы ищем структуру, которая наилучшим образом разделяет, какие изменения расстояний происходят, сокращенном по размерности Гильбертовом пространстве, что обеспечивает введением новых переменных, таких, как «состояния» геосфер или активность Солнца оценивать влияние на них изменения гравитации или Солнечной активности (по подстрочнику Gemini).

Модель взаимодействия «Солнце — Земля — Планеты-гиганты»

Включение Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна критически важно для системного анализа по нескольким причинам:

Солнце- Главный гравитационный центр и источник электромагнитного влияния.

Юпитер и Сатурн - Основные регуляторы барицентра Солнечной системы; их циклы определяют долгопериодные вариации орбиты Земли.

Уран и Нептун - Вносят вклад в сверхдолгопериодные резонансы, влияющие на глубокие процессы в геосфере. Для настоящего сообщения приведены иллюстрации на базе полученных результатов в завершающей модели.

Слайды презентации будут размещены как fail.pdf по адресу <https://www.researchgate.net/profile/Boris-Shmagin/research>

Начало изучения гравитационной динамики было заложено в изучении подземного стока

П. Е. Хортон (1935), предложил концепт расчленения гидрографа на составляющие поверхностного и подземного стока на основе учета осадков и температуры воздуха на водосборе.

Реализацию концепции картографирования подземного начал Б. И. Куделин (1960), совместно с О. В. Поповым и его лабораторией в ГГИ. Карты строились экспертно, мелкого масштаба и были сделаны для территории бывшего СССР.

Всеволожский В. А. с коллективом сотрудников кафедры Гидрогеологии МГУ и с участием ГГИ в 1969 подготовил карту среднего масштаба.

Следующая (вторая) карты среднего масштаба была завершена в 1975 (Шмагин), в которой начала применяться статистика для обоснования границ районирования. С этого началось

применение статистического обучения для системного изучения речного стока в различных масштабах.

Именно с картами подземного стока, осуществилась концепция формирования подземного стока с методикой его картографирования, выделена стоковая оболочка гидросферы и сформулирован системный подход пространственно-временной изменчивости формирования речного стока как сложного (кибернетического) взаимодействия оболочек геосферы Земли.

Сформировавшиеся в рамках концепции теория и практика, завершающая превращение концепции о подземном стоке в системную для геосфер теорию, была доложена на конференциях 2023 (10, 11).

Научное значение концепция, возможные пути реализации и применение получаемых в ней результатов

Концепция позволяет непосредственно начать исследовать влияние внешней среды на взаимодействие геосфер. Особенно это важно для наиболее динамичных электромагнитных компонент компонентов атмосферы, магнитосферы, ионосферы и экзосферы.

Результаты проведенного моделирования позволяют значительно более детальное формулирование исследовательских задач и планирование включения в модели элементов Солнечной системы.

Получение системной теории существенно улучшит прогнозное моделирование за счет снижения неопределенности моделей, полученных и используемых для замкнутой геосферы. Успешное проведение названной выше исследовательской деятельности по созданию системной теории взаимодействия геосфер под влиянием полей и сил Солнечной системы возможно и должно основываться на междисциплинарном сотрудничестве исследовательских и академических центров, ведущих научную работу в области естественных наук и физико-математических дисциплин.

Образовательная среда (специализации, программы и учебные пособия) должна быть создана для подготовки участников, а затем и исполнителей названных и затем ими планируемых исследований. Принципиальные моменты такой среды были реализованы на Кафедре Гидрогеологии МГУ им. М. В. Ломоносова в период 1986-96 гг. (Шмагин, 2024)

Заключение

Выводы: Концепция сформулирована и опробована. Системный подход к изучению и картографированию речного стока был выработан в течение более полувека и именно с него начинается выход с исследованиями из геосфер в Солнечную систему. Моделирование для понимания подхода и подготовки моделей проводилось с апреля 2025 и результаты были представлены на трех международных конференциях (12, 13, 15). За несколько дней до настоящей

презентации было доложено о развитии и детализации применительно к естественно-научным системам и процессам, в сущности, математической и общекультурной концепции о временных рядах на семинаре в ИВП АН. Подготовка данных и моделирование проведено при сотрудничестве профессора Нира Кракауера (Prof. Nir Krakauer, City College of New York, NY, USA).

Использованные источники

1. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1960. 343 с.
2. Либерман А. А., Шмагин Б.А. Опыт исследования скрытой периодичности подземного стока // Вести. Моск. ун-та, Сер. 4. Геология. - 1984. С. 148-150.
3. Шмагин Б.А. Системный подход и методы исследования структуры стоковой оболочки умеренного пояса // Гидрологические исследования ландшафтов. - Новосибирск: Наука СО, 1986. - С. 38-48.
4. Шмагин Б.А., Результаты факторно-регрессионного моделирования условий формирования подземного стока Московского и Волго-Камского артезианских бассейнов // Гидрологические исследования ландшафтов. - Новосибирск: Наука СО, 1986. - С. 119-131 (соавторы Р.П. Кочеткова, В.М. Прилепин, Н.С. Ратнер и др.)
5. Шмагин Б.А., Районирование территории по гидрогеологическим условиям формирования подземного стока на основе системного подхода (на примере Нечерноземья) // Тр. ГГИ. - Л. : Гидрометеиздат, 1988. - Вып. 335. - С. 95-113.
6. Чесалов С. М., Шмагин Б.А. Статистические методы решения гидрогеологических задач. - М. : Недра, 1989. - 176 с.
7. Шмагин Б.А., От Лиц Чернова к Гильбертову пространству: о визуализации в науках о Земле. Курс многомерной статистики: из истории кафедры Гидрогеологии МГУ. Международная конференция «Математика в созвездии наук». К юбилею ректора МГУ, академика Виктора Антоновича Садовниченко. Изд. МОСК. УНИВ., 2024.
8. Хортон Р. Е. «Поверхностный сток, как явление», 1935, часть I – Анализ гидрографа (на англ. яз.)
9. Электронная библиотека Института философии РАН, <https://iphlib.ru/library>
10. Shmagin, B. A., "The Chernoff Faces & Visualization of Empirical Data in Geosciences: Ontology & Semantic of the Analysis". 6th Spatial Statistics conference, which will be held at the University of Colorado Boulder, USA, from 18 - 21 July 2023. Climate and the Environment.

11. Shmagin, B. A., Hydrology as a Regional Science: Ontology & Semantic of Quantitative Cartography”. STAHY 2023 13th International Workshop Statistical Hydrology, 8th - 10th November 2023, Institute for Experiential AI, Northeastern University, Boston, Massachusetts (USA).

12. Shmagin, B. A., “Notes on Study Great Lakes Watershed Hydrology in Scale Including the Solar System”, 68th Annual Conference on Great Lakes Research, June 2–6, 2025, Creating Great Lakes Resilience, Milwaukee, Wisconsin. University of Wisconsin-Milwaukee, School of Freshwater Sciences

13. Shmagin, B. A., Krakauer, N., “A Concept of Using Gravity for Models of Geoscience Time Series: Earth's Position in the Solar System”. AGU25 New Orleans, LA 15-19 December 2025, “Where Science Connects Us.”

14. Shmagin, B. A., Krakauer, N., “Notes on Conceptualization, Ontology and Semantic for the Spatial Statistic in Earth Sciences”. Spatial Statistics 2025: At the Dawn of AI. NH Leeuwenhoorst, Noordwijk, The Netherlands, 15-18 July 2025

15. Sunspot Index and Long-term Solar Observations получены на сайте Solar Influences Data Analysis Center, Royal Observatory of Belgium (<https://sidc.be/SILSO/dayssnplot>)

Приложения

Ключевые таблицы моделирования структуры и динамики гравитации для Солнца и пяти планет (Земля, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) (слева), а также электромагнитной активности Солнца (Солнечные пятна, среднемесячные и среднегодовые значения).

Ключевые таблицы факторных нагрузок (справа), полученных по матрицам средне - месячных и годовых значение расстояния и солнечных пятен, месячных изменений (название переменной имеет в конце букву D) расстояния и солнечных пятен.

Factor Loadings (Varimax normalized) Extraction: Principal components (Marked loadings are > .700000)						Factor Loadings Extraction: Principal components (Marked loadings are > .700000)						
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
Sun-Earth	0.01	0.79	0.00	-0.01	0.01	Sun-Earth	-0.03	-0.89	0.09	0.00	-0.02	0.02
Sun-Earth_D	-0.01	0.79	-0.00	0.00	-0.02	Sun-Earth_D	-0.03	-0.81	-0.07	0.01	0.01	-0.01
Sun-Jupiter	0.23	0.03	-0.07	0.17	0.70	Sun-Jupiter	0.10	0.13	0.78	0.03	0.04	0.11
Sun-Jupiter_D	0.58	-0.01	-0.05	-0.03	0.15	Sun-Jupiter_D	0.64	0.08	-0.13	0.07	-0.05	0.11
Sun-Neptune	0.10	-0.01	-0.16	0.64	-0.06	Sun-Neptune	0.08	0.01	0.02	0.22	0.76	0.08
Sun-Neptune_D	-0.15	0.01	-0.72	0.05	0.06	Sun-Neptune_D	-0.18	0.04	0.01	0.71	0.01	0.01
Sun-Saturn	0.01	0.01	0.03	-0.45	0.02	Sun-Saturn	-0.08	0.02	0.00	-0.02	0.14	-0.83
Sun-Saturn_D	-0.01	-0.00	0.29	0.40	0.01	Sun-Saturn_D	-0.06	0.00	-0.03	-0.24	0.60	-0.02
Sun-Uranus	-0.06	0.01	0.73	0.01	0.04	Sun-Uranus	-0.08	0.05	-0.00	-0.74	0.04	0.01
Sun-Uranus_D	-0.17	0.01	0.05	0.57	0.10	Sun-Uranus_D	-0.18	0.00	0.02	-0.03	0.27	0.58
Mean SnSp #	0.92	0.01	-0.00	0.09	-0.12	Avr SnSp #	0.93	0.01	0.10	0.01	0.21	-0.12
Mean SnSp StDvn	0.87	-0.01	0.21	-0.20	-0.11	Mean SnSp StDvn	0.87	-0.02	0.04	-0.25	-0.16	-0.13
MeanD SnSp #	0.22	0.05	-0.06	0.14	-0.70	AvrD SnSp #	0.13	0.15	-0.77	0.02	0.05	0.09
Expl Var	2.10	1.26	1.23	1.20	1.06	Expl Var	2.09	1.35	1.25	1.23	1.12	1.10
Prp Totl	0.16	0.10	0.09	0.09	0.08	Prp Totl	0.16	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08