

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

***Подсекция
лаборатории охраны геологической среды (ЛОГС)***

Руководитель – зав. кафедрой, профессор Сергеев В.И.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2021

Содержание:

1. Факторы, определяющие эффективность инженерных барьеров безопасности при приповерхностном захоронении РАО В.Л. Воронин, М.А. Царёв	2
2. Принципиальные основы разработки состава влажных глинистых смесей для создания геохимических барьеров в емкостях для захоронения РАО М.А. Царев, Р.В. Сергеев, Н.Ю. Степанова	5
3. Оценка достоверности прогнозирования эффективности защитных экранов В.И. Сергеев, М.Л. Кулешова, И.В. Авилина, Т.Г. Шимко	10
4. Оценка мощности мерзлых толщ о.Новая Сибирь с помощью математического моделирования А.В. Гаврилов, В.В. Малахова, Е.И. Пижанкова, А.А. Попова	14
5. Современные рельефообразующие процессы на шельфе западного сектора Российской Арктики Е.И. Пижанкова, А.В. Гаврилов, А.А. Кучейко	19
6. Кинетика растворения гипсоангидритов в воде при 25° С. IV. Константа скорости реакции растворения ангидрита А.Л. Лебедев, И. В. Авилина	25

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРИПОВЕРХНОСТНОМ ЗАХОРОНЕНИИ РАО

В.Л. Воронин, М.А. Царёв

Сооружения, предназначенные для долговременного хранения радиоактивных отходов, являются наиболее ответственными с точки зрения обеспечения их безопасности для окружающей среды. Конструкция и материалы, используемые при строительстве сооружения, должны обеспечить предотвращение распространения радиоактивных веществ не только в период его эксплуатации, но и на значительный период времени после его закрытия. При этом необходимо рассматривать сценарии, предусматривающие отсутствие квалифицированного обслуживания сооружения, а также и его повреждение. Возможное распространение радиоактивных веществ должно быть оценено на серии математических моделей, на которых задаются возможные сценарии существования сооружения. При этом определяющим условием адекватности этих моделей является правильное задание граничных условий, определяющих, в первую очередь, движение воды внутри и за пределы сооружения. Формирование загрязнённых вод внутри сооружения возможно за счёт просачивания её через кровлю сооружения, при нарушении целостности кровли сооружения в результате аварийных ситуаций, а также при подтоплении основания сооружения в результате подъёма уровня грунтовых вод. Необходимо оценить количество воды, поступающей в сооружение при различных сценариях и срок заполнения сооружения.

Вариант 1. Поступление воды через ненарушенную кровлю сооружения. Этот вариант развития ситуации рассматривается как сценарий нормальной эволюции сооружения. Определяющую роль в фильтрации воды через верхний барьер имеет соотношение потенциальной величины инфильтрационного питания и проницаемости защитного барьера. При этом в течение гарантийного срока службы железобетонного перекрытия (300 лет после закрытия объекта) этот элемент верхнего защитного барьера играет основную роль в препятствовании поступлению воды в сооружение. Величина инфильтрационного питания, оцененная, исходя из климатических характеристик: величин осадков, испарения с поверхности и поверхностного стока, составляет $2,06 \times 10^{-4}$ м/сут. Максимальная величина градиента напора при фильтрации через верхний барьер составляет 1. Минимальная проницаемость барьера на пути фильтрации равна $1,73 \times 10^{-6}$ м/сут. Скорость фильтрации через барьер, будет равна величине коэффициента фильтрации. Расход воды, поступающей внутрь сооружения, составит $7,15 \times 10^{-3}$ м³/сут. При таком инфильтрационном питании за 300 лет будет заполнено 17 % от объема пустот внутри

модульного сооружения. Этот объём будет полностью поглощён внутренней засыпкой сооружения. Распространение загрязнения за счёт фильтрации при таком сценарии невозможно.

Вариант 1.1. Поступление воды через кровлю сооружения, после разрушения железобетонного перекрытия. Этот вариант соответствует сценарию нормальной эволюции сооружения через 300 лет после его закрытия. При этом после разрушения железобетона основную сдерживающую роль при проникновении воды в сооружения будет играть экран из глин, имеющих проницаемость равную 10^{-5} м/сут. Расход воды, поступающей внутрь сооружения, составит $4,14 \times 10^{-2}$ м³/сут. Заполнение пустот внутри сооружения произойдёт через: 337 лет. Таким образом, через 337 лет после разрушения железобетонных конструкций при условии сохранения целостности глиняного противофильтрационного экрана возможно полное заполнение сооружения водой и формирование условий для фильтрации загрязнённых вод через нижние защитные барьеры.

Вариант 2.1. Поступление воды через кровлю сооружения, после нарушения целостности всех перекрывающих барьеров. Разрушение железобетонных конструкций возможно через 300 лет после закрытия сооружения. Разрушение экрана из глины возможно под воздействием неконтролируемого произрастания деревьев. При сохранении рельефа и неизменности климата, количество воды поступающей внутрь сооружения будет определяться величиной инфильтрационного питания — $2,06 \times 10^{-4}$ м/сут. Расход, поступающей внутрь сооружения, составит 0,85 м³/сут. Заполнение пустот внутри сооружения произойдёт через: 16,4 года. При долгосрочных прогнозах этот срок может рассматриваться как мгновенное заполнение водой.

Вариант 2.2. Поступление воды через кровлю сооружения, после нарушения целостности всех перекрывающих барьеров и изменения водных условий на поверхности. Такой вариант также рассматривается в качестве альтернативного сценария. Увеличение инфильтрационного питания возможно как за счёт возрастания количества осадков при изменении климата, так и при существенном изменении рельефа, обеспечивающем поступление поверхностного стока с окружающей территории на участок размещения объекта, в том числе при хозяйственном освоении земель вокруг объекта. Количественная оценка объёма воды, поступающего в сооружение при этом сценарии невозможна, поэтому должно рассматриваться мгновенное заполнение сооружения водой до отметки крыши.

Во всех приведённых вариантах происходит заполнение сооружения водой. Часть внутреннего объёма сооружения заполняется бентонитом, который при намокании становится материалом с низкой проницаемостью. Однако после разрушения контейнеров с

отходами, объём, занимаемый контейнерами, будет представлять среду, имеющую намного более высокую проницаемость, чем бентонит и материал нижнего защитного барьера. При полном заполнении сооружения водой после разрушения контейнеров высота водного столба, формирующего напор в нижней его части, составит 6 метров. В таких условиях основным механизмом миграции загрязнения может стать конвективный перенос. Такой вариант, как наихудший будет рассматриваться на модели, реализуемой на следующем этапе работ. При этом будут также учтены процессы сорбции, распада и диффузии.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СОСТАВА
ВЛАЖНЫХ ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ
В ЕМКОСТЯХ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО

М.А. Царев, Р.В. Сергеев, Н.Ю. Степанова

Один из способов обращения с твердыми радиоактивными отходами (РАО) – захоронение их в специально оборудованные хранилища. При поверхностном захоронении РАО сооружаются специальные железобетонные модули, в которые помещают контейнеры с твердыми отходами. Обязательными элементами такого хранилища являются инженерные барьеры безопасности (ИББ), которые должны обеспечить долговременную изоляцию радионуклидов. Для сооружения ИББ используют бентонитовые глины и глинистые материалы на их основе, а также смеси природных глин разного минерального состава. Барьеры должны обладать малой проницаемостью и высокой поглощающей способностью в отношении потенциальных загрязнителей. В последнее время исследования материалов для ИББ приобрели особую актуальность в связи с необходимостью захоронения больших объемов накопленных РАО.

Барьеры из глинистых материалов предусматриваются как по внешнему контуру железобетонного модуля, так и внутри него – например, в виде засыпки сухим бентонитовым порошком внутреннего пространства, в котором размещаются контейнеры. Контейнеры с отходами могут иметь разнообразные объемы и форму. Это разнообразие ведет к формированию пустот внутри модуля, которые при сооружении внутренних барьеров безопасности остаются незаполненными порошком бентонита. Таким образом, необходимость максимальной защиты окружающей среды остается не реализованной. Реализация максимальной защищенности может быть достигнута в результате использования сорбента, способного заполнить все пустоты в емкости для размещения отходов.

На получение такого сорбента был направлен комплекс исследований ЛОГС. Исследования связаны с определением свойств влажных смесей, способных заполнять все пустоты в пределах модуля размещения отходов. Твердая фаза таких влажных смесей должна обладать высокой сорбционной способностью, исходной вязкостью, позволяющей заполнять пустоты любого раскрытия, а также способностью переходить в пластичное малопроницаемое состояние через заданный период времени.

При подборе состава влажных смесей, были рассмотрены бентонитовые суспензии на примере бентонита Зырянского месторождения и смеси бентонитового порошка с местными глинами различного минерального состава.

Выполненный комплекс исследований, кроме оценки гранулометрического и минерального составов, включал определение характера изменения вязкости суспензии во времени с увеличением количества бентонита.

Бентонитовые суспензии. Подбор состава бентонитовой суспензии с оптимальными свойствами (вязкостью и временем пастообразования) показал, что при добавке бентонита в количестве более 90 г на 1 л воды бентонитовая суспензия в течение 10-15 минут переходит в пастообразное состояние. Важно, что резкое повышение вязкости осложняет подачу суспензии из емкости приготовления в емкость для заполнения пустот. Таким образом, для Зырянского бентонита установлена предельная концентрация твердого материала в суспензионном растворе (далее – растворе) – она не должна превышать 90 г на литр воды.

Суспензии из местных глин. Исследование суспензий из глин Челябинских месторождений – ожелезненной глины и каолиновой глины, показало, что при добавке в воду с последующим перемешиванием любого количества глинистого материала в суспензии наблюдается процесс интенсивной седиментации. На представленной фотографии можно видеть результаты процесса седиментации (рис. 1). Через 10 минут после приготовления суспензии 25% от ее объема составляет практически чистая вода.

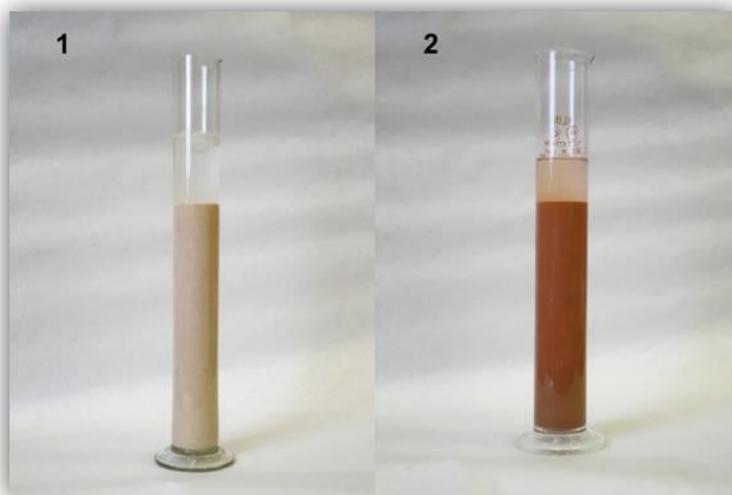


Рис. 1 – Проявление осаждения твердой фазы в растворе, содержащем 840 г/л глин: 1- каолиновая суспензия; 2 – суспензия из ожелезненной глины.

Глино-бentonитовые суспензии. Дальнейшим шагом было получение суспензий из бентонита и глины. Подбор их состава показал, что при добавлении любой из исследованных местных глин (ожелезненной и каолиновой) в уже приготовленную суспензию бентонита (90 г на 1 л воды) в количестве до 900 г глины на литр бентонитовой суспензии позволяет получить устойчивый раствор, обладающий вязкостью, приемлемой для заполнения пустот различного объема и формы. При этом формируется однородная по составу паста в пределах всего ее объема (рис. 2).



Рис. 2. Паста, на основе суспензии из ожелезненной глины (840 г/л) при добавке бентонита 90 г/л

Процесс седиментации твердой фазы в растворе с момента приготовления глино-бentonитовой суспензии не наблюдается (рис. 3).

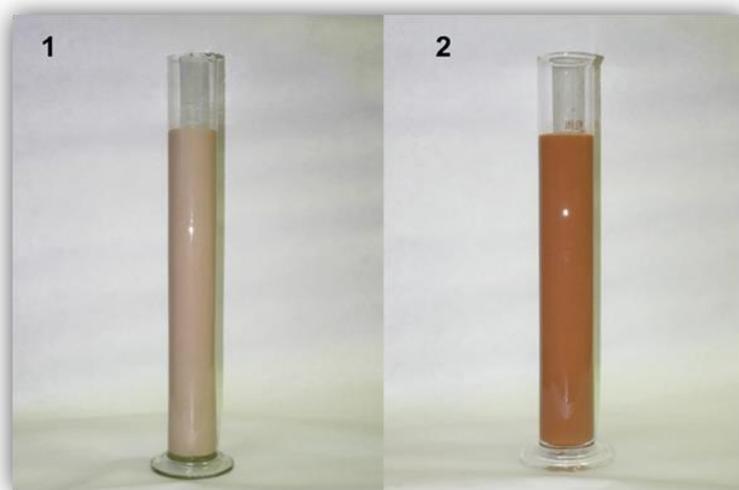


Рис. 3. Отсутствие осаждения твердой фазы в растворе, содержащем бентонит 90 г/л и глину 840 г/л : 1- каолиновая суспензия; 2 – суспензия из ожелезненной глины.

В таблице 1 приведены данные об изменении вязкости глино-бentonитовых суспензий во времени.

Таблица 1

Изменение вязкости глино-бentonитовых суспензий (90 г/л бентонита + 840 г/л глины)

Момент приготовления суспензии	Характеристика вязкости по времени истечения из прибора ВЗ-246 через отверстие 4 мм, с	
	Суспензия из каолиновой глины	Суспензия из ожелезненного глинистого грунта
Начальная вязкость	17,12	12,76
Вязкость через 1 час	18,5	13,55

Сравнение сорбционной способности по Cs суспензий разного состава. Помимо технологических свойств глинистых суспензий, важным фактором при их оценке в качестве материала для ИББ является сорбционная способность. Для ее оценки в ЛОГС были получены емкости поглощения по Cs для изучаемых глинистых материалов – зырянского бентонита и ожелезненной глины. Определение сорбционной емкости производилось в статических условиях. Емкость поглощения бентонита в отношении Cs составляет 2,57 мг/г, ожелезненной глины – 2,22 мг/г.

Полученные величины позволяют дать оценку подобранным суспензиям по их поглощающей способности. Так, использование для приготовления раствора лишь бентонита приводит к тому, что сорбционная способность получаемой пасты недостаточна для ее рассмотрения в качестве надежного геохимического барьера, так как сорбирующей твердой фазы в объеме суспензии менее 10%. Глино-бentonитовая суспензия, благодаря возможности ввести в ее состав гораздо больше сорбирующего глинистого материала, обладает гораздо большей емкостью поглощения.

В таблице 2 приведены расчетные величины сорбционной емкости 1 м³ бentonитовой и глино-бentonитовой суспензий по Cs. Из таблицы следует, что разработанный принципиальный подход к определению оптимального состава влажной смеси позволяет получить приемлемый на производстве геохимический барьер с сорбционной способностью, в 7 раз превышающей сорбционную способность бentonитовой суспензии.

Состав, содержание компонентов и поглощающая способность в отношении Cs

1 м³ бентонитовой и глино-бентонитовой суспензий

Состав раствора	Компонент раствора	Содержание компонента кг/л	Сорбционная емкость на 1м ³ раствора
Бентонитовый	бентонит	87,2	224
	вода	968,0	
Глино-бентонитовый	бентонит	67,8	1543
	ожелезненная глина	617,0	
	вода	747,0	

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования по подбору состава бентонитовой и глино-бентонитовой суспензий позволили разработать принципиальный подход к определению состава влажных смесей для заполнения пустот в модуле для захоронения отходов. Он заключается в совмещении свойств исследованных материалов. Это позволяет получить исходный раствор приемлемой вязкости, который переходит через заданное время в плотную однородную по составу пасту, обладающую высокой сорбционной способностью и малой проницаемостью.

Обязательным условием приготовления влажной смеси должно быть соблюдение последовательности ее приготовления. Вначале должна готовиться бентонитовая суспензия. Только после готовности бентонитовой суспензии в нее добавляется при постоянном перемешивании глинистый материал.

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ

В.И. Сергеев, М.Л. Кулешова, И.В. Авилина, Т.Г. Шимко

Прогноз миграции загрязняющих элементов в окружающей среде, в том числе в геохимических барьерах, возможен на базе экспериментально получаемых параметров массопереноса. Эти параметры, как правило, должны характеризовать конкретные условия изучаемого объекта, а именно: элементы-загрязнители и непосредственно среду (грунты или искусственно создаваемый противомиграционный экран), в которой они мигрируют. Количественная оценка эффективности геохимического барьера подразумевает определение времени, в течение которого этот барьер будет служить для иммобилизации загрязнителей. По разработанной в ЛОГС методике [1], в таких расчетах определяется время, в течение которого все элементы-загрязнители будут удерживаться в пределах толщи геохимического барьера. Окончанием службы барьера считается время, когда на его нижней границе концентрация загрязнителя составит величину, равную ПДК.

Для количественной оценки геохимического барьера в лабораторных экспериментах на образцах малого размера должны быть получены значения миграционных параметров, использование которых затем позволяет прогнозировать изменение концентрации загрязнителя во времени для экрана любой мощности.

Математические модели массопереноса давно разработаны и широко используются в научных и практических целях. Вместе с тем, достоверность прогнозных решений требует подтверждения. Трудность экспериментального подтверждения достоверности прогноза определяется низкой проницаемостью природных геохимических барьеров из глинистых материалов. Получение миграционных параметров элементов-загрязнителей в лабораторных условиях при высоте образца глиняного барьера порядка 4 см, как правило, требует времени от 1 до 3 месяцев, что затрудняло до сих пор выполнение экспериментов для подтверждения адекватности используемой математической модели.

В настоящее время в ЛОГС разработан геохимический барьер высокой проницаемости и сорбционной способности. Разработка этого сорбента для тяжелых металлов позволила оценить достоверность прогноза миграции загрязнителя и, соответственно, достоверность оценки эффективности геохимического барьера при мощностях, используемых на производственных объектах.

Для описания характера массопереноса загрязнителей при фильтрации раствора в слое сорбента используется микродисперсионная модель массопереноса, учитывающая процесс сорбции [2]:

$$n \frac{dc(x,t)}{dt} = D \frac{d^2c(x,t)}{dx^2} - v \frac{dc(x,t)}{dx};$$

где t - время; n - эффективная пористость, D - коэффициент микродисперсии, v - скорость фильтрации, x - расстояние вдоль пути фильтрации ($0 < x < \infty$).

Коэффициенты n и D – искомые параметры. Лабораторный эксперимент заключается в получении «выходной кривой» при фильтрации раствора с исследуемым элементом (или элементами) через колонку с материалом геохимического барьера. Выходная кривая – это кривая изменения относительной концентрации элемента на выходе из колонки во времени (рис. 1).

Модельное решение уравнения имеет вид

$$\bar{C} = 0,5 \operatorname{erfc} \xi, \quad \xi = \frac{n \cdot l - v \cdot t}{2\sqrt{D \cdot n \cdot t}}$$

где \bar{C} – относительная концентрация, n – эффективная пористость, D – коэффициент микродисперсии, l – расстояние (длина образца), v – скорость, t – время

Для определения миграционных параметров n и D используется метод наименьших квадратов. Ищем те значения параметров, при которых достигается минимум функции качества, равный сумме квадратов разностей модельных и экспериментальных значений относительных концентраций по всем моментам времени опыта. Программа написана Авилиной И.В. на языке Visual Basic и оформлена в виде таблицы данных в Excel -7, задаваемых пользователем, и макроса, в котором осуществляются расчеты. В качестве метода минимизации использован метод спирального координатного спуска.

Определив n и D , можно решать прогнозные задачи, а именно: рассчитать распределение концентрации элемента в толще барьера на заданный момент времени, или определить время, когда на нижней границе барьера появится относительная концентрация, равная, например, ПДК.

В данном исследовании была поставлена следующая задача: определить параметры n и D на образце малого размера, затем, используя эти параметры, выполнить прогнозный

расчет выходной кривой для образца большего размера. После этого получить экспериментальную выходную кривую на колонке, для которой сделан прогнозный расчет, и сравнить прогнозную и экспериментальную выходные кривые.

Для испытаний использовался щавелево-алюмосиликатный ксерогель (щавелево-алюмосиликатный гель, нанесенный на поверхность кварцевого песка и высушенный на воздухе). Этот ксерогель имеет достаточно высокую проницаемость и сорбционную емкость и удобен для проведения подобных экспериментов [3]. В качестве элемента-загрязнителя был взят раствор соли CdSO_4 с концентрацией Cd 100 мг/л. Эксперименты проводились на двух колонках – высотой 4 и 22 см.

На колонке высотой 4 см получена выходная кривая по Cd , показанная на рис. 1 голубым цветом.

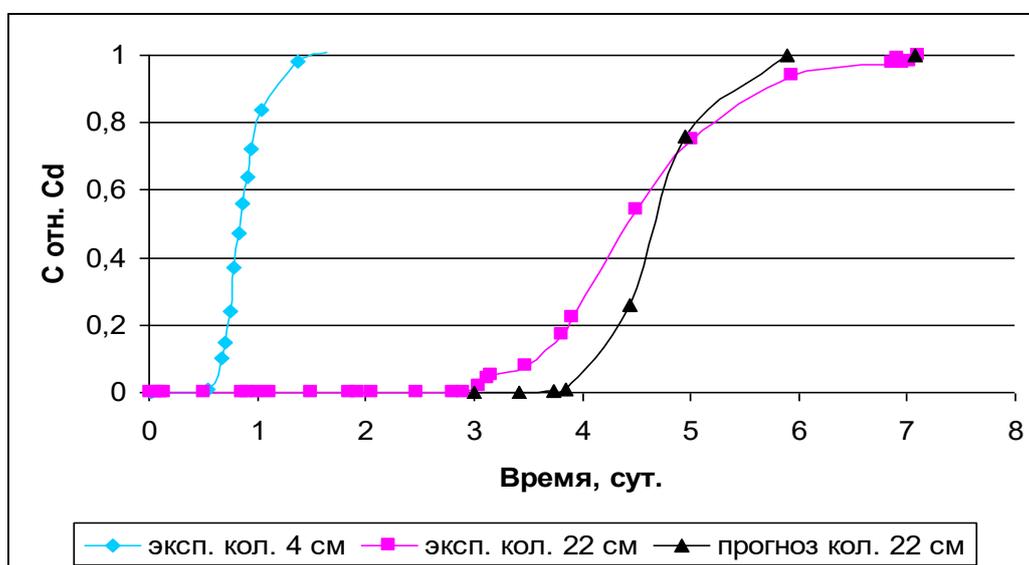


Рис. 1. Сорбция Cd на щавелево-алюмосиликатном ксерогеле.

Экспериментальные выходные кривые на колонках высотой 4 см (голубая) и 22 см (розовая).

Прогнозная выходная кривая для колонки 22 см (черная)

По этой выходной кривой были получены следующие значения миграционных параметров: $n=27,65$, $D=9,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сут.}$ Используя эти значения, для колонки высотой 22 см был сделан прогноз характера изменения концентрации Cd на выходе из колонки во времени. Прогнозная выходная кривая показана черным цветом.

Затем была получена выходная кривая для Cd на колонке высотой 22 см (показана на рис. 1 розовым цветом). Скорость фильтрации была одинаковой в обоих экспериментах, прогноз также сделан при такой же скорости фильтрации. Как видно, прогнозная и экспериментальные выходные кривые для колонки высотой 22 см достаточно близки.

Параметры n и D , рассчитанные по выходной кривой на колонке 22 см составили: $n=25,96$, $D=4,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сут}$. Несмотря на определенную разницу в коэффициентах микродисперсии, прогнозные значения концентраций мало отличаются от экспериментальных (для колонки высотой 22 см) при времени более 5 суток. Процент относительной ошибки не более 6. На момент окончания опыта 7 сут. концентрации Cd на выходе из колонки в прогнозе и эксперименте различаются на 0-1%.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента получены данные, свидетельствующие об адекватности принятой математической модели процессам массопереноса элементов, и доказана возможность применения параметров, получаемых в лабораторных условиях на образцах геохимического барьера малого размера для прогнозирования характера миграции в геохимическом барьере, приближенном к промышленному размеру.

Литература

1. Сергеев В.И., Шимко Т.Г., Кулешова М.Л., Малашенко З.П., Петрова Е.В. Методика количественной оценки степени защищенности подземных вод от загрязнения в районах захоронения токсичных и радиоактивных отходов. Авторское свидетельство № 8570 от 17 мая 2005 года.
2. Лукнер Я., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод.- М: Недра,1986.- с.207
3. Сергеев В.И., Данченко Н.Н., М.Л. Кулешова, Шимко Т.Г. и др. Оценка эффективности песчано-гелевого материала как сорбционного экрана на пути миграции радионуклидов // Вопросы атомной науки и техники. Н-т. Сб., Сер. «Физика ядерных реакторов». Рос. Научн. Центр «Курчатовский институт» ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» М., 2009, С.42-48

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ О. НОВАЯ СИБИРЬ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Гаврилов¹, В.В. Малахова², Е.И. Пижанкова¹, А.А. Попова³

¹ЛОГС,

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

³ООО «Северные Изыскания»

Оценка мощности мерзлоты Новосибирских островов и о. Новая Сибирь в частности, является актуальной. Прилегающий шельф оценивается как перспективный в отношении углеводородного сырья. Поэтому данные о мощности на островах необходимы для верификации шельфовых геокриологических данных, получаемых с помощью математического моделирования.

Сведения о мощности получены в 1970-х гг. в результате геологической съемки, сопровождавшейся геотермическими наблюдениями в скважинах. Эти данные дискутируются, поскольку геотермическими наблюдениями была охвачена только самая верхняя часть разреза. Для более определенной оценки мощности мерзлоты о. Новая Сибирь авторами настоящих исследований проведено математическое моделирование. В исследовании освещаются три основные его части. Во-первых, это сценарий, он модифицирован по сравнению с опубликованным [7], во-вторых – тестирование или верификация сценария и в-третьих – результаты моделирования.

Сценарий геологического развития в последние 200 тыс. лет. Построен в соответствии с геологическими данными 2000-х гг., зафиксировавшими существование оледенения в прошлом [1; 2; 3; 6]. Оледенение развивалось в морских условиях. Каркас сценария составила модель гляциоизостатических движений земной коры [7]. Основные ледниковые и постледниковые явления в границах о. Новая Сибирь реконструированы авторами на основе упомянутых геологических данных. Это глубина погружения ледникового ложа, его современное гипсометрическое положение, мощность ледника, время перехода морского осадконакопления в континентальное. Палеогеографический сценарий, построенный по этим и глобальным температурным данным, состоял из четырех этапов. Первый 200-190 тыс. л.н. был морским. Начальные мерзлотно-температурные условия: мерзлоты не было. Температура придонной воды -1°C .

Второй этап (190-127 тыс.л.н.) определялся оледенением конца среднего неоплейстоцена. Реконструированная нами мощность ледника достигала 800 м. Субгляциальные породы промерзали. В соответствии со средним геотермическим

градиентом $2^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, полученным по скважине пос. Тикси, температура пород под ледником задается равной -15°C .

Третий этап – этап дегляциации (127-70 тыс.л.н.) характеризовался охлаждающим влиянием деградирующего ледника. Оно было столь велико, что самое теплое время в неоплейстоцене – казанцевское межледниковье (МИС-5е) в регионе не проявилось. Вместо этого в течение большей части казанцевского времени формировался быччагыйский ледовый комплекс [8].

Четвертый этап – с 70-55 тыс.л.н. по сей день был этапом промерзания в субэаральных условиях. Начало его - 70 тыс.л.н. - было задано в соответствии с радиоуглеродными датировками ископаемых мамонтового комплекса [2; 6]. На севере, где остатки ледника и перекрывавшие его морские отложения канарчакской свиты выходят на поверхность, задано, что осушение происходило позже – около 55 тыс.л.н.

Тестирование палеогеографического сценария сделано по данным скважины в урочище «Деревянные горы» (участок 1), где геотермические наблюдения были проведены до глубины 200 м. Использовались также результаты математического моделирования. Отсутствие точек геотермических наблюдений в интервале 15-200 м не дает возможности обоснованно определить величину геотермического градиента и оценить мощность мерзлоты. Поэтому задача заключалась в получении серии модельных термограмм, которые совместно с фактической должны дать возможность сделать это более обоснованно.

Поэтому для получения таких термограмм сначала было выяснено, что влияние похолодания МИС-2 не зафиксировано в современном температурном поле Новосибирских островов [5]. Далее, для моделирования задавалась реальная последовательность напластования горных пород в разрезе. В результате моделирования были получены три модельные термограммы, которые отражают чередование низкотеплопроводных угленосных толщ и более теплопроводных песчано-глинистых толщ деревяногорской свиты позднего мела.

Все три модельные термограммы дают значения близкие к замеренной температуре на глубине 200 м и позволяют удостовериться в реалистичности сценария. Оценка мощности мерзлоты по указанным термограммам дает значения от 255 до 280 м. Это на 20-45 м больше величины, рассчитываемой по фактическим данным. Полученные значения являются более обоснованными, чем используемые в настоящее время.

Мощность многолетнемерзлых пород. Верифицированный сценарий дал возможность использовать его для расчета мощности мерзлых пород в различных частях о. Новая Сибирь. В результате моделирования получено, что в четырех из пяти районов

мощность мерзлых пород составляет от 270-280 до 330 м. И только один район характеризуется значением, превышающем 650 м. Это район неглубокого (60 м) залегания фундамента эпикиммерийской плиты Восточно-Сибирского шельфа.

Первые четыре района с меньшей мощностью мерзлоты характеризуются рыхлым мезо-кайнозойским чехлом мощностью от 300 до 500 м. Высокая влажность пород чехла, обуславливая большие затраты тепла на фазовые переходы в процессе промерзания-оттаивания, определяет их относительно неглубокое промерзание. И наоборот, в районе неглубокого залегания фундамента малая мощность чехла (60 м) и почти полуторакилометровая толща практически безводных юрских высокотеплопроводных песчаников, алевролитов, аргиллитов определило формирование мерзлых пород мощностью более 650 м.

Помимо теплопроводности большое значение на глубину промерзания пород имеет температура замерзания поровой влаги. Ее высокие значения в разрезах севера острова дают возможность проявиться охлаждающему действию морской воды (рис. 1). Морской период в середине позднего неоплейстоцена здесь продолжался 33 тыс. лет – на 15 тыс. лет дольше, чем на юге острова. Однако он не сказался на сокращении мощности мерзлоты в этот период. На севере острова оттаивание замедлилось на глубинах 50 и 90 м соответственно (рис. 1, участки 3 и 4) в силу противодействия волны холода, существовавшей весь этот период в связи с температурой морской воды, равной $-1,8^{\circ}\text{C}$. Противодействие было обусловлено разностью температур морской воды и замерзания поровой влаги. На участке 3 она составляла $-1,5$, на участке 4 - $-1,8^{\circ}\text{C}$.

Роль истории геологического развития выявляется при сопоставлении мощности мерзлых пород острова Новая Сибирь и прибрежных районов континента, расположенных южнее. Мощность мерзлой толщи Новой Сибири, где она сверху представлена рыхлыми отложениями, на 120-170 м меньше, чем на участке скважины Ильдикиллях на континенте [4], хотя он находится в 500 км южнее. Там, где разрез представлен преимущественно скальными породами (участок 4 и скважина в пос. Тикси), мощность одинакова, несмотря на разницу в их широтном положении в 400 км.

Различие в мощности обусловлена существенно меньшим сроком существования острова в субэаральных условиях. Оно длилось всего 55-70 тыс. лет, тогда как субэаральная обстановка на континенте существовала по меньшей мере в течение всего неоплейстоцен-голоцена.

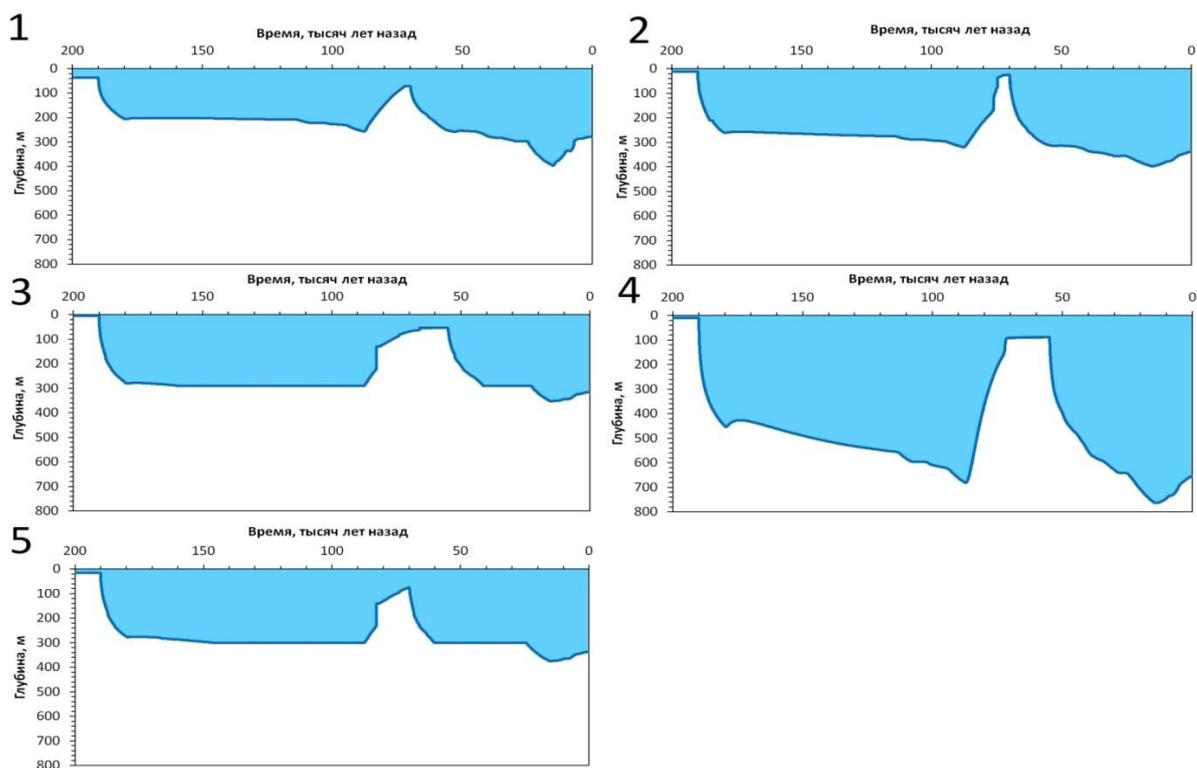


Рис. 1. Эволюция мощности мерзлых толщ о. Новая Сибирь в последние 200 000 лет на следующих участках: 1 – выход меловых пород на поверхность (урочище «Деревянные горы»); 2 - морская голоценовая терраса (юго-запад острова); 3 – м. Каменный, восток острова; 4 – район неглубокого залегания фундамента, север острова; 5 – равнина, сложенная отложениями ледового комплекса позднего неоплейстоцена (юг острова)

Выводы

1. Формирование мощности мерзлых пород острова обусловлено историей геологического развития региона. Она определила развитие криосферы в последние 200 тыс. лет и строение мезо-кайнозоя Новой Сибири.

2. Меньшая мощность мерзлых пород о. Новая Сибирь, чем на побережье континента, связана со значительно меньшим временем их существования и промерзания в субаэральных условиях.

3. Большую роль в формировании мощности мерзлых пород о. Новая Сибирь играют также состав, водно-физические и теплофизические свойства пород.

Литература

1. Анисимов М.А., Тумской В.Е., Иванова В.В. Пластовые льды Новосибирских островов как реликт древнего оледенения // Материалы гляциологических исследований, 2006,

вып. 101, с. 143-145.

2. Басилян А.Э., Никольский П.А. Опорный разрез четвертичных отложений мыса Каменный (Новая Сибирь) // Бюл. Комис. по изучению четвертичного периода, 2007, № 67, с. 76-84.

3. Басилян А.Э., Никольский П.А., Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю. Возраст следов покровного оледенения Новосибирских островов по данным $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - датирования раковин моллюсков. Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen, 2010. С. 506-514.

4. Девяткин В.Н. Тепловой поток криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1993, 165 с.

5. Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, изд. ИМ СО АН СССР, 1981, с. 28-38.

6. Тумской В.Е. Особенности криолитогеоза отложений Северной Якутии в среднем неоплейстоцене – голоцене // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 1, с. 12-21.

7. Gavrilo A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // Geosciences. – 2020. - V. 10 (12). - 484. <https://doi.org/10.3390/geosciences10120484>

8. Wetterich S., Tumskey V., Rudaya N., Kuznetsov V. et al. Ice complex permafrost of MIS5 age in the Dmitry Laptev Strait coastal region (East Siberian Arctic) // Quaternary Science Reviews. -2016. – 147. – P. 298–311.

СОВРЕМЕННЫЕ РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Е.И. Пижанкова¹, А.В. Гаврилов¹, А.А. Кучейко²

¹ ЛОГС, ²Компания «РИСКСАТ»

Основными процессами, которые до сих пор находятся в поле зрения подавляющего числа исследователей арктической береговой зоны, являются термоабразия и термоденудация, приводящие к отступанию берегов. Существенно меньшее внимание уделяется аккумулятивным процессам.

Спутниковый мониторинг позволяет отслеживать динамику рельефа только в течение последних 40-45 лет. Однако многие положительные формы рельефа береговой зоны и мелководий, испытывающие современную динамику, сформировались ранее. Поэтому во многих случаях мониторинг опирается на исторические данные.

Материалы и методы

Основными материалами для исследования являлись космические снимки (КС) Landsat, Sentinel и Terra/MODIS за 1973-2020 гг., данные сайта bestmaps.ru/map/esri/sat, а также топографические и геологические карты разных масштабов. Кроме того, использовались исторические, гляциологические и разнообразные геологические материалы.

Современные и архивные космо-и аэроснимки поставляют важную информацию об основных процессах береговой зоны и мелководий арктических морей по отступанию берегов, современному осадконакоплению и многолетнему промерзанию новообразованных осадков в субарктических условиях.

Рельефообразующие процессы

Основными из них являются гидродинамические (морские и аллювиально-морские), геокриологические (мерзлотные), ледовые и гляциальные процессы.

Потепление климата, особенно усилившееся в начале XXI века, приводит к ускорению деструктивных береговых процессов и донного оттаивания (в интервале глубин 2-10 м), которые поставляют значительное количество дисперсного материала в шельфовую зону. С другой стороны, сокращение ледовитости, активизируя гидродинамические процессы, способствует новообразованию банок и островов на мелководьях - там, где в прошлом происходил размыв и понижение донной поверхности.

То или иное проявление процессов рельефообразования зависит от секторальности. В Баренцевоморском секторе в отличие от восточных морей в проявлении динамики

значительную роль играют гидродинамические процессы, поскольку бóльшую часть года акватория свободна от морских льдов.

Большую роль в рельефообразовании на мелководьях играют крупные реки. За счет их твердого стока в сочетании с морскими гидродинамическими процессами происходит образование островов и наращивание кос по контурам аванделът и периферии приустьевых областей. Таковы, например, острова и косы по внешнему краю Печорской губы (о-ва Гуляевские Кошки, коса Русский Заворот), Гыданской губы и Енисейского залива.

Геокриологические процессы. Образование островов и банок сопровождается их синкриогенезом. Об этом процессе свидетельствует, в частности, формирование современных полигональных форм вследствие морозобойного растрескивания на голоценовых косах малых островов. Лучше всего они выражены со стороны лагуны, поскольку защищены от прямого волнового воздействия моря и имеют более тонкий состав осадков (глины, илы, пелиты). При изучении снимков с высоким пространственным разрешением эти формы обнаружены, например, на томболо между о. Расторгуева и малым островом в притаймырской части Карского моря.

Участки осадконакопления на Карском шельфе фиксируются в береговой зоне и участках положительных новейших тектонических движений в пределах акватории. Наблюдения за динамикой произведены у западного берега Ямала: на островах Шараповы и Марресальские кошки и в заливе Вэбаркапах.

Шараповы кошки посещались поморами в 1690 г. Информация об этом событии содержится в книге голландца Н. Витсена «Северная и Восточная Тартария», изданной в 1705 г. [3]. Острова представляли собой в то время мель с отдельными холмиками, один из которых позволил промышленникам зимовать на этом месте. В настоящее время - это группа низких островов. Их абс. высота у западного берега составляет 0,3-0,7 м, у восточного 1-2 м. На крайнем южном острове есть высоты 5-6 м. Западные берега являются формирующимися, а по высоте восточных - можно оценить темп осадконакопления за прошедшие 300 лет. Несложные расчеты дают значения средней скорости от 0,2-0,3 до 1 см/год. По данным Васильева и др. [1] обычно на поверхности лайды накапливается 1-6 мм/год современных супесчаных наносов. После экстремального по продолжительности и интенсивности шторма осенью 2009 г. вся поверхность лайды (Марресальских кошек) была покрыта слоем песчаных наносов толщиной до 0,4 м.

Наибольшую величину смещения береговой линии п-ва Ямал и песчаных островов показывают наши данные по заливу Вэбаркапах.

Промерзание при образовании мелей и островов способствует фиксации их местоположения. Данные, полученные Н.Ф. Григорьевым [2] по островам и проливам вдоль западного Ямала интересны тем, что предоставляют сведения для практического подтверждения этого положения. По данным Н.Ф. Григорьева на лаиде о. Болотный среднегодовая температура пород на глубине 5 м составляла $-4,0 \dots -5,0$ °С. Глубина нулевых годовых амплитуд температуры достигала 4–5 м. При этом мощность новообразованных многолетнемерзлых пород (ММП) – 5-10 м.

Измерения температуры верхнего слоя отложений современных аккумулятивных форм проводились Васильевым и др. [1] в 2008-2015 гг. Они подтвердили их современное промерзание с новообразованием ММП. Глубина нулевых годовых амплитуд температуры промерзающих отложений не превышает 3–4 м. Среднегодовая температура мерзлых пород на глубине 3,5 м составляет $-3,5 \dots -4,5$ °С. Это примерно на 1,5 °С выше, чем в скважинах на поверхности третьей морской террасы п-ова Ямал.

Ледовые процессы. Рельефообразующая деятельность морских льдов на мелководьях в современное потепление, как и прежде, весьма существенна. Их участие в осадконакоплении осуществляется несколькими способами. Это аккумуляция в результате транспортной деятельности льда, содержащего большое количество минеральных и органических включений. Весьма существенную рельефообразующую роль играет бульдозерное перемещение льдов и донных осадков вверх по подводному склону дрейфующими льдами под напором прижимных ветров. Считается, что оно является одним из основных процессов, способствовавших образованию барьерных островов у берегов Аляски. В ряде случаев осадконакопление может совершаться в волновой или ветровой тени стамух, а также вокруг последних во время штормов. На застамушенных участках после стаивания стамух осадки могут быть опреснены, что облегчает их промерзание, что благоприятствует осадконакоплению.

В холодные периоды или годы, по-видимому, имеет место также погребение поверхностных льдов (остатков припая, стамух, айсбергов) морскими осадками. С их последующим вытаиванием могут быть связаны причлененные к ранее существовавшим островам дугообразные косы и бары, формирующие лагуны. Их особенно много в северной части Карского моря, где связь лагун с ранее захороненными стамухами или айсбергами наиболее вероятна.

Выделяемые по космоснимкам косы обозначают места образования плотин, которые ежегодно наращиваются новыми порциями аллювия. Плотины превращают долины ручьев в подпрудные бассейны. Сопоставление летнего и весеннего снимков юго-западной

оконечности о. Русский (архипелаг Норденшельда в Карском море) показывает, что разрушение припая происходит поэтапно. Сначала разрушается припай во внутренней лагуне, а заканчивается на границе внешней лагуны с морем. Основным агентом разрушения припая являются полые воды. Обычно косы считаются результатом деятельности морского волнения. Однако в этой широтной зоне участие моря в образовании кос и баров видится не главной.

Гляциальные процессы. Современное сокращение арктических ледников обнажает подледниковый рельеф. Поэтому, а также в связи с положительными гляциоизостатическими движениями на периферии ледниковых систем Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, Северной Земли и островных ледников (Шмидта, Ушакова) появляются новые острова.

Выводные ледники архипелага Новая Земля за последнее столетие подверглись значительной деградации, что можно видеть при сравнении карты Русанова 1910 г. с современным космоснимком Новой Земли. По данным космосъёмки, в 2020 г. деградация выводных ледников продолжилась со скоростью выше среднегодовой за последние 7 лет. Общие потери площади ледника Вилькицкого (южный) на западном побережье Новой Земли в 2020 г. составили около 1 км², за период с 2013 по 2020 г. - 3,5 км². Всего за 49 лет (1952-2020 гг.) площадь ледника Вилькицкого уменьшилась на 40,6 км².

В результате быстрого отступления фронта ледников Вилькицкого (рис. 1) и Розе (последний расположен на восточном побережье Новой Земли) обнажается подледниковый рельеф, возникают острова. Обилие спутниковых данных позволило достаточно точно зафиксировать даты образования островов в 2020 г. Так, остров у ледника Вилькицкого площадью 5,6 га возник 09.07.2020 и подтвержден в экспедиционном отрядом Комплексной экспедиции Северного флота и РГО «Арктические Архипелаги-2020» [4]. Второй малый остров у выводного ледника Розе появился в августе 2020 года. Площадь нового объекта составляет 2,6 га. Фронтальная часть ледника Розе также быстро разрушается и отступает, потеря площади в 2020 г. составила 0,6 км², а за последние семь лет (2013-2020 гг.) – 2,2 км².

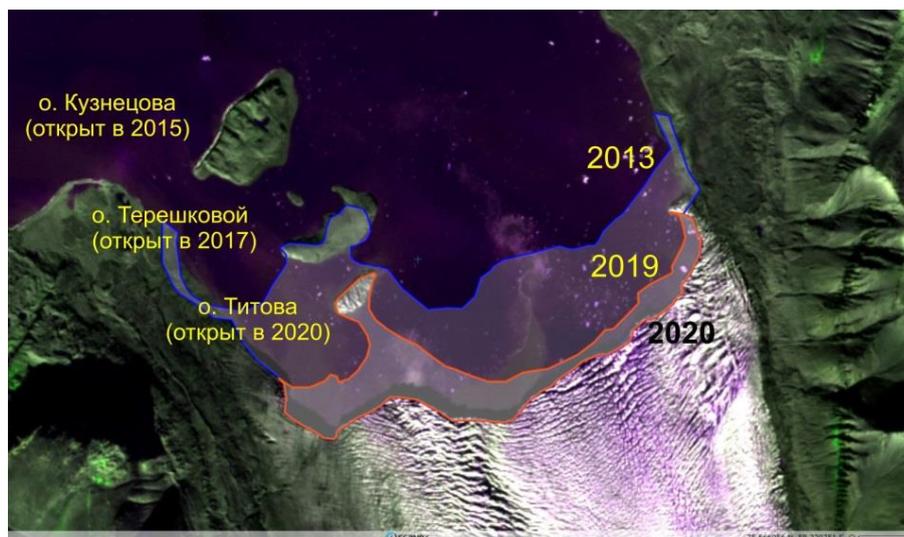


Рис. 1. Деградация ледника Вилькицкого и образование островов (названия островов Терешковой и Титова – временные, поскольку пока не утверждены постановлением Правительства РФ).

Выводы

1. На шельфе арктических морей западного сектора Российской Арктики рельефообразование осуществляется с участием гидродинамических, геокриологических, ледовых и гляциальных процессов.
2. Осадконакопление на мелководьях идет в условиях повышения уровня моря, происходящего со скоростью около 3 мм/год. Поэтому, как установлено для восточно-сибирского сектора шельфовых морей Российской Арктики, оно становится заметным и отражается на космических снимках для положительных морфоструктур, испытывающих тектоническое поднятие, темп которого соизмерим или превосходит скорость повышения уровня моря.
3. Важную роль играют геокриологические процессы, фиксирующие при многолетнем промерзании новообразованные формы рельефа (бары, острова).
4. Ледовые процессы стимулируют осадконакопление за счет перемещения донных осадков дрейфующим льдом, способствуют промерзанию, опресняя грунты на местах посадки стамух, обеспечивают защиту новообразованных островов и банок от штормов, формируют плотины в устьевых частях мелких рек.
5. Современное сокращение арктических ледников обнажает подледниковый рельеф. Поэтому, а также в связи с положительными гляциоизостатическими движениями на периферии ледниковых систем Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, Северной Земли и островных ледников (Шмидта, Ушакова) появляются новые острова.

б. Применение космоснимков в силу их большого количества, различного разрешения и времени съемки (годы и сезоны), широкого территориального охвата, возможности использования ГИС-технологий и программ обработки позволяет изучать широкий комплекс экзогенных геологических процессов, развивающихся в береговой зоне и на мелководьях арктических морей.

Литература

1. Васильев А.А., Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д., Широков Р.С. Новообразование многолетнемерзлых пород на низких лайдах Карского моря // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 39-46.
2. Григорьев Н.Ф. Криолитозона прибрежной части Западного Ямала. Якутск, Якутское книжное издательство, 1987, 110 с.
3. Николаас Витсен. "Северная и Восточная Тартария", выпуск 1692-1705 г. Электронный сборник // Европейский дом, 2010.
4. <https://www.rgo.ru/ru/article/ostrov-sushchestvuet-ekspedicionnyy-otryad-podtverdit-geograficheskoe-otkrytie-rossiyskih>

КИНЕТИКА РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОАНГИДРИТОВ В ВОДЕ ПРИ 25° С. IV. КОНСТАНТА СКОРОСТИ РЕАКЦИИ РАСТВОРЕНИЯ АНГИДРИТА

А.Л. Лебедев, И. В. Авилина

При решении прогнозных задач, связанных с изменением проницаемости массива сульфатных карстующихся пород и процессом набухания в массивах, содержащих глинисто-сульфатные породы, используются уравнения кинетики реакции растворения *только*, гипса или ангидрита с подземными водами в виде:

$$S' R_s / V = dC/dt = k_e S' (C_m - C)^r / V = k S' (1 - C/C_m)^r / V \quad (1)$$

где R_s – скорость реакции растворения; k_e , k – константы скорости реакции растворения ($k_e = k/C_m^r$); C_m , C – концентрация ионов Ca^{2+} соответственно равновесия и на момент времени t ; V – объем раствора; S' – площадь удельной поверхности; r – формальный порядок реакции. Считается, что ангидрит растворяется гораздо медленнее, чем гипс. Скорость процесса растворения пород, *целиком* сложенных гипсом и ангидритом (т.е. гипсоангидритов) практически не изучалась.

Процесс трансформации ангидрита в гипс объясняется на основе нескольких механизмов: диффузией молекул воды в кристаллическую решетку ангидрита и/или гетерогенными химическими реакциями растворения ангидрита и осаждения гипса. В природных условиях предполагаемый механизм процесса гидратации ангидрита, как правило, связывается с влиянием факторов, обусловленных данной геологической обстановкой [1-3].

В предыдущих работах [4, 5] представлены результаты предварительной обработки данных экспериментальных исследований кинетики растворения гипсоангидритов в воде (25°С). Использовались модели, учитывающие протекание гетерогенных химических реакций в масштабе всего процесса гидратации ($S' = \text{const}$, [5]) и его начальных стадий ($S' \neq \text{const}$, [4]). С учетом полученных параметров кинетики этих реакций (см. уравнение 1) становится возможным схематизировать процесс гидратации ангидрита и характеризовать отдельные его стадии.

Цель данной работы – составление модели кинетики растворения гипсоангидритов в воде для начальных стадий этого процесса, т.е. без учета реакции осаждения гипса и определение параметров кинетики растворения ангидрита в воде, как наименее изученных. В этом случае, на заключительном этапе исследований возможно составление общей модели процесса гидратации с учетом кинетики реакций растворения ангидрита и осаждения гипса.

Предполагалось, что система уравнений, описывающая процесс гидратации ангидрита на его начальных стадиях выглядит следующим образом:

$$V \frac{dC_1}{dt} = k_1 \xi_1 S_1 (C_{m_1} - C_1), \quad - \text{ скорость растворения гипса} \quad (2)$$

$$V \frac{dC_2}{dt} = k_2 \xi_2 S_2 (C_{m_2} - C_2)^2, \quad - \text{ скорость растворения ангидрита} \quad (3)$$

$$V \frac{dC_3}{dt} = \frac{D}{h} S_3 (C_{m_2} - C_2), \quad - \text{ скорость выщелачивания ангидрита} \quad (4)$$

$$V \frac{dC_4}{dt} = k_4 \xi_2 \frac{h}{h_{\max}} S_3, \quad - \text{ скорость образования гелеобразного слоя} \quad (5)$$

с общей концентрацией ионов Ca^{2+} в растворе,

$$C = C_1 + C_2 + C_3 - C_4 \quad (6)$$

где, ξ – фактор шероховатости ($\xi = S'/S$); D – коэффициент диффузии; h, h_{\max} – толщина слоя геля за время t и по окончании опыта, соответственно. $C_{m_2} = \text{const}$, $C_{m_1} = C_{m_1}(C_2)$. Индексы 1 – 4 характеризуют величины C, C_m, k, ξ и S при растворении гипса (2), ангидрита (3), его выщелачивании (4) и формировании слоя геля (5) соответственно. Образование этого слоя сопровождается изменением значений величин S_2, S_3 и h , ($S_1 = \text{const}$). Для учета подобных изменений система уравнений дополнялась зависимостями вида: $S_{2,3} = S_{2,3}(C)$, и $h = h(C)$.

Кинетические кривые были получены в условиях кинетического режима растворения плоской шероховатой поверхности в воде, в ячейке со статическим режимом работы при 25°C и $P 0.1$ МПа [6]. Расчетные величины k_2, k_4 и D подбирались таким образом, чтобы дать наилучшее приближение к экспериментальным данным. Решались прямые и обратные задачи. Прямая задача — определение значений концентрации при заданных значениях параметров $C_{m_1}, C_{m_2}, \xi, S_1, S_2$, обратная — определение параметров, соответствующих минимуму функции качества [7].

Обработка опытных данных в виде зависимостей $C(t)$ показала, что использование системы уравнений (2) – (6), при схематизации процесса гидратации ангидрита в воде, вполне оправдано для начальных стадий этого процесса при температуре раствора 25°C и содержании гипса и ангидрита в породе ($\text{min} \div \text{max}$), соответственно $4 \div 76$ и $21 \div 95$ мас.%. В

результате процесса гидратации ангидрита на его поверхности (в периферийных частях зерен) происходит формирование гелеобразного гипсового слоя $h_{max} \approx 0.0005$ см. Результаты исследования указывают на линейный характер графиков в координатах $C-R_s$ и зависимость величины R_s от содержания гипса и ангидрита в породе. Рассчитанное значение величины $k_2 = 0.005 \text{ см}^4/(\text{ммоль} \cdot \text{с})$ оказалось сходным со значениями литературных источников.

Литература

1. Калинина Т. А. Автореф. дисс. канд. г.- м. наук. Казань: ФГБУН Горный ин-т УрО РАН, 2015, 185 с.
2. Печеркин А. И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 1986, 172 с.
3. Klimchouk A. The dissolution and conversions of gypsum and anhydrite. *Int. J. Speleol.* 1996, **25**(3-4), 21–36.
4. Лебедев А. Л., Авилина И. В. Кинетика растворения гипсоангидритов в воде при 25° С. III. Обработка экспериментальных данных на основании традиционных модельных решений и с учетом одной общей концентрации раствора. // Ломоносовские чтения, МГУ, 2020, <https://conf.msu.ru/rus/event/4305/>.
5. Лебедев А. Л., Авилина И. В. Экспериментальные исследования кинетики растворения гипсоангидритов в воде // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология 2019, 3, 93-96.
6. Лебедев А. Л. Кинетика растворения гипса в воде // Геохимия. 2015, 9, 828–841.
7. Шестаков В. М., Невечеря И. К., Авилина И. В. Моделирование контаминации патогенных микроорганизмов в подземных водах. М.: Академкнига, 2007. 95 с