

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

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

Руководитель –

и.о. зав. лабораторией, ведущий научный сотрудник Лапицкий С.А.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2023

Содержание:

1. Константа скорости реакции растворения гипса в воде А.Л. Лебедев, И. В. Авилина	2
2. Геофильтрационная схематизация сценариев эволюции сооружения для приповерхностного захоронения радиоактивных отходов В.Л. Воронин	4
3. Определение K_d для моделирования процессов распространения радионуклидов на проектируемых объектах захоронения РАО Т.Г. Шимко, М.Л. Кулешова, Н.Н. Данченко	10
4. Формализация моделей профильной фильтрации в задачах инженерной гидрогеологии / Программа PERFIL v.4 (CrossNet) М. В. Лехов	16
5. Мерзлые толщи шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского на современном этапе исследований А.В. Гаврилов, В.В. Малахова, Е.И. Пижанкова	21
6. Особенности геологической среды побережья моря Лаптевых А. Ю. Деревягин	26
7. Изучение полигонального рельефа и повторно-жильного льдообразование на Карском шельфе А.В. Гаврилов, Е.И. Пижанкова	31

КОНСТАНТА СКОРОСТИ РЕАКЦИИ РАСТВОРЕНИЯ

ГИПСА В ВОДЕ

А. Л. Лебедев, И. В. Авилина

Кинетическое уравнение представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее зависимость скорости реакции от концентраций, влияющих на нее веществ, которое включает коэффициент пропорциональности, называемый константой скорости реакции (k). Скорость реакции является положительной величиной, которая в любой момент реакции выражается соотношением $\pm dc/dt$, где c – концентрация какого-либо реагирующего вещества или продукта (Мэйтис, 1984)

$$dc/dt = kf(c_1 \dots c_i) \quad (1)$$

k – представляет собой значение скорости реакции при значениях активностей (концентраций) реагирующих веществ, равных единице. Размерность константы скорости определяется размерностями скорости реакции и остальных множителей в правой части уравнений (Киперман, 1979).

Большая часть исследований кинетики растворения гипса в воде основывается на основном законе физического растворения, сформулированным А. Н. Шукаревым в 1896 г. (т.е. плотность потока вещества с поверхности растворения пропорциональна концентрационному недонасыщению раствора). В этих работах использовались уравнения кинетики гетерогенных реакций растворения на поверхности гипса (R_s) в виде:

$$S'R_s/V = dC/dt = k_e S'(C_m - C)^r/V = kS'(1 - C/C_m)^r/V, \quad (2)$$

где 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. И уравнения скорости транспорта реагентов и продуктов реакций растворения (R_t) через пограничный диффузионный слой, толщиной (δ), в объем раствора

$$SR_t/V = dC/dt = DS(C - C_b)/(V\delta), \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии ионов и молекул в пограничном слое; S – площадь геометрической или видимой поверхности растворения; C , C_b – концентрации на границах диффузионного слоя. Обработка экспериментальных данных проводилась по уравнению (2) при $R_s < R_t$ и по решениям, полученным в предпосылке $R_s = R_t$ и зависимостям, установленным Левичем (1952) для расчетов величины δ , т.е. по уравнениям (2) и (3).

Большая часть исследований проведена при 20-25 °С. В этих работах природный и искусственный гипс растворяли в воде в виде суспензии, гранул, отдельных монокристаллов, плоской гладкой и шероховатой поверхности и поверхности стенок круглого канала в блоке

породы. Значения величин k и r (25 °С) составляют диапазон $10^{-6} - 10^{-4}$ ммоль/(см² с), и 1 – 4.5, соответственно. При температуре от 0 до 85 °С величина энергии активации $E = 15.1 - 46$ кДж/моль.

Очевидно, что при подобном разбросе значений E , k и r , отсутствует возможность достоверной схематизации скорости процесса растворения гипса, в решении научных и инженерных задач, связанных с вопросами экологии, геологии, строительства инженерных сооружений, улучшения характеристик строительных материалов и т.д. Цель данной работы – определение температурной зависимости величины k_{cp} в диапазоне значений 0 – 85°С.

В докладе представлены результаты интерпретации литературных данных кинетики растворения при усреднении параметров (E_{cp} , k_{cp}) относительно факторов, влияющих на эти величины. Анализировались только те исследования, в которых обосновывается методика определения величины S' и учитывается влияние гидродинамической обстановки при определении k .

Результаты. Среднее значение константы скорости растворения гипса (k_{cp}) – 2.68×10^{-5} ммоль/см²с при 25 °С. Температурная зависимость k подчиняется уравнению Аррениуса. Выделены две характерные области: в первой – растворимость гипса в воде увеличивается с повышением температуры (0-37°С, $E_{cp} = 40$ кДж/моль), во второй – величина растворимости уменьшается (37-85 °С, $E_{cp} = 21.5$ кДж/моль).

С учетом рассчитанных значений k_{cp} и E_{cp} построены температурные зависимости вида $\log k_{cp} - 1000/T, K$ для диапазонов значений 0-37 °С и 37-85 °С: при $k_{cp} = 2.68 \times 10^{-5}$ ммоль/см²с, $E_{cp} = 40$ кДж/моль и $k_{cp} = 4.92 \times 10^{-5}$ ммоль/см²с (Wang, 2015), $E_{cp} = 21.5$ кДж/моль соответственно.

Список литературы

- Киперман С.Л. (1979) Основы химической кинетики в гетерогенном катализе. М., Химия, 352 с.
- Мэйтис Л. (1984) Введение в курс химического равновесия и кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 484 с.
- Wang, Z. N., Zhu J. B., Wu H., Chen C. G., Liu S. Z. (2015) Dissolution Kinetics of Calcium Sulfate Dihydrate. Ciesc Journal, 66,1001–1006.

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ СЦЕНАРИЕВ
ЭВОЛЮЦИИ СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

В.Л. Воронин

Оценка потенциальной экологической опасности объектов захоронения радиоактивных отходов является сложной задачей. Действующие нормативные документы требуют выполнить прогноз распространения загрязнения от объекта на весь срок возможного воздействия. Учитывая, что значительную часть потенциальных загрязнителей составляют долгоживущие радиоактивные изотопы, срок, на который выполняются прогнозные расчёты, превышает сотни тысяч лет. Это существенно больше возраста человеческой цивилизации, и обоснованно предсказать судьбу сооружения, в особенности в части возможного антропогенного воздействия, невозможно, поэтому во всех прогнозных расчётах в условиях неопределённости рассматривается «консервативный» сценарий, предполагающий наихудшие с точки зрения потенциального распространения загрязнения варианты.

При составлении прогноза рассматривается как сценарий нормальной эволюции сооружения, предполагающий отсутствие внешних негативных воздействий, так и альтернативные сценарии, предполагающие такое воздействие. Проектной документацией предусматривается несколько этапов существования сооружения. На этапе эксплуатации происходит заполнение сооружения отходами. При этом осуществляется постоянный контроль радиационной обстановки внутри и снаружи сооружения. Экологическая безопасность объекта обеспечивается технологическими решениями, заложенными в проектной документации. Любые отступления от проектных решений оперативно ликвидируются. Принимается, что поступление загрязнения в окружающую среду на этом этапе не происходит. Продолжительность этого этапа составляет десятки лет. Следующий этап — активного администрирования — составляет 100 лет после закрытия сооружения. В течение этого этапа ведётся активный контроль состояния объекта и сохраняется производственная база для своевременного обнаружения и ликвидации мест утечки радиоактивных материалов в окружающую среду. На следующем этапе — пассивного администрирования ведётся мониторинг состояния объекта и окружающей среды в районе его размещения. Проектной документацией предусматривается продолжительность этого этапа в 300 лет после закрытия объекта, однако этот срок при необходимости может быть продлён. В пределах срока пассивного администрирования невозможно негативное антропогенное воздействие на объект.

Таким образом, при прогнозе возможного распространения загрязнения рассматриваются следующие сценарии: сценарий нормальной эволюции, предусматривающий естественную деградацию сооружений и различные альтернативные сценарии, предусматривающие внешние воздействия на объект. В качестве внешних воздействий природного характера рассматривается сейсмическое воздействие, приводящее к нарушению ограждающих конструкций сооружения, повреждение конструкций сооружения растительностью, а также повышение уровня грунтовых вод, приводящее к подтоплению. Как антропогенные воздействия рассматривается проведение на месте расположения объекта строительных работ, приводящее к разрушению верхней части сооружения, а также бурение скважины, приводящее к разрушению защитных конструкций сооружения и в верхней и в нижней части. Таким образом, проектная документация рассматривает следующие сценарии развития сооружения:

- *сценарий нормальной эволюции*, предусматривающий деградацию конструкций сооружения в соответствии с гарантийными сроками их эксплуатации;
- *аварийный сценарий 1*, предусматривающий нарушение конструкций сооружения в результате внешнего воздействия;
- *аварийный сценарий 2*, предусматривающий подтопление сооружения при подъёме уровня подземных вод.

Потенциальное радиоактивное загрязнение подземных вод от сооружения ППЗРО напрямую зависит от водного режима, формирующегося внутри сооружения. Ключевыми факторами, определяющими возможность распространения загрязнения, являются возможность проникновения воды внутрь сооружения, а также возможность оттока загрязнённой воды за его пределы. Для предотвращения водного обмена массива отходов с окружающей средой в конструкцию сооружения включены инженерные барьеры безопасности (ИББ). В число ИББ входят: контейнеры, содержащие отходы, слабопроницаемый сорбирующий глинистый материал, заполняющий сооружение после окончания его эксплуатации, конструктивные элементы сооружения, глинистые экраны, создаваемые на внешнем контуре сооружения. Материалы, составляющие элементы ИББ различаются по сроку службы. Для таких барьеров как контейнеры с отходами и железобетонные конструкции сооружения существует гарантийный срок, в течение которого они обеспечивают изоляцию отходов. После окончания гарантийного срока начинается деградация элементов ИББ, в процессе которой они теряют свои защитные свойства. Деградация элементов ИББ происходит постепенно, в течение длительного времени, однако, учитывая требование о «консервативности» прогноза распространения загрязнения, при проектировании рассматривается наихудший из всех возможных сценариев, при котором все элементы ИББ теряют свои защитные свойства непосредственно по окончании гарантийного срока. Барьеры безопасности, состоящие из глинистых материалов,

сохраняют защитные свойства в течение всего прогнозируемого периода. Их нарушение возможно только при внешних воздействиях.

Рассмотрим изменения свойств различных элементов ИББ в ходе их деградации с точки зрения влияния на движение воды внутри сооружения. Контейнеры, содержащие отходы в период гарантийного срока являются непроницаемыми ячейками, полностью изолирующими отходы от поступления воды. После окончания гарантийного срока целостность металлических контейнеров может быть нарушена в результате коррозии, железобетонных контейнеров — в результате появления сквозных трещин. Размеры отверстий, формирующихся в контейнерах обеспечивают беспрепятственное движение воды, поэтому весь объём отходов, включая контейнеры, может рассматриваться как единый проницаемый массив. Проницаемость этого массива зависит в основном от проницаемости материала отходов, при этом, предполагается, что она будет существенно превышать проницаемость глинистых материалов, используемых в качестве заполнителя пустого пространства внутри сооружения.

В железобетонных элементах конструкции сооружения по окончании гарантийного срока возможно формирование сквозных трещин. Размеры и расположение этих трещин, а также время их формирования имеют случайный характер, однако в пределе произойдёт полное разрушение бетона, в результате которого бетон превратится в песчаный материал с карбонатным заполнителем. Учитывая требование о «консервативности» прогноза принимается, что это произойдёт сразу по окончании гарантийного срока.

Глинистые материалы, используются в качестве внутреннего заполнителя сооружения и для создания барьеров на его внешнем контуре. В процессе эволюции сооружения не ожидается снижения противифльтрационных свойств глинистых материалов. Нарушение барьеров основанных на глинистых материалах возможно в результате внешнего воздействия, как природного, так и техногенного характера. Проектными материалами рассматриваются альтернативные сценарии развития сооружения, предусматривающие нарушение барьеров в результате сейсмического воздействия, строительных работ или бурения скважины через сооружение. Конечно, техногенные нарушения возможны только после окончания периода пассивного администрирования.

Адекватность прогнозного моделирования зависит от геофильтрационной и геомиграционной схематизации процессов фильтрации и миграции внутри сооружения. Учитывая, что время, необходимое для естественной деградации сооружения и, тем более, время, затрачиваемое на его разрушение, при реализации аварийных сценариев существенно превышает срок прогноза, моделирование фильтрации внутри сооружения выполняется в стационарном режиме. Результаты прогноза возможного распространения загрязнения из сооружения при различных сценариях его эволюции зависят от задания граничных и начальных условий в модели

сооружения. При разработке прогнозной модели были определены модельные сценарии, различающиеся заданием граничных условий, соответствующие различным сценариям эволюции сооружения.

Модельный сценарий 1 соответствует сценарию нормальной эволюции сооружения. Объем сооружения занятый контейнерами с отходами и железобетонными конструкциями задан модельными блоками с относительно высоким коэффициентом фильтрации. Объем, занятый глинистыми материалом, и защитные глинистые экраны заданы без изменений относительно начальной конфигурации. На границах фильтрационной модели заданы следующие условия:

- верхняя граница — граничное условие I рода с напором, равным высоте сооружения;
- внешние боковые границы сооружения — граничное условие I рода с напором равным высоте расположения моделируемого слоя;
- внутренние боковые границы (границы между отсеками сооружения) — граничное условие II рода с нулевым расходом;
- нижняя граница — граничное условие I рода с нулевым напором.

Схема модели отсека сооружения представлена на рис. 1.

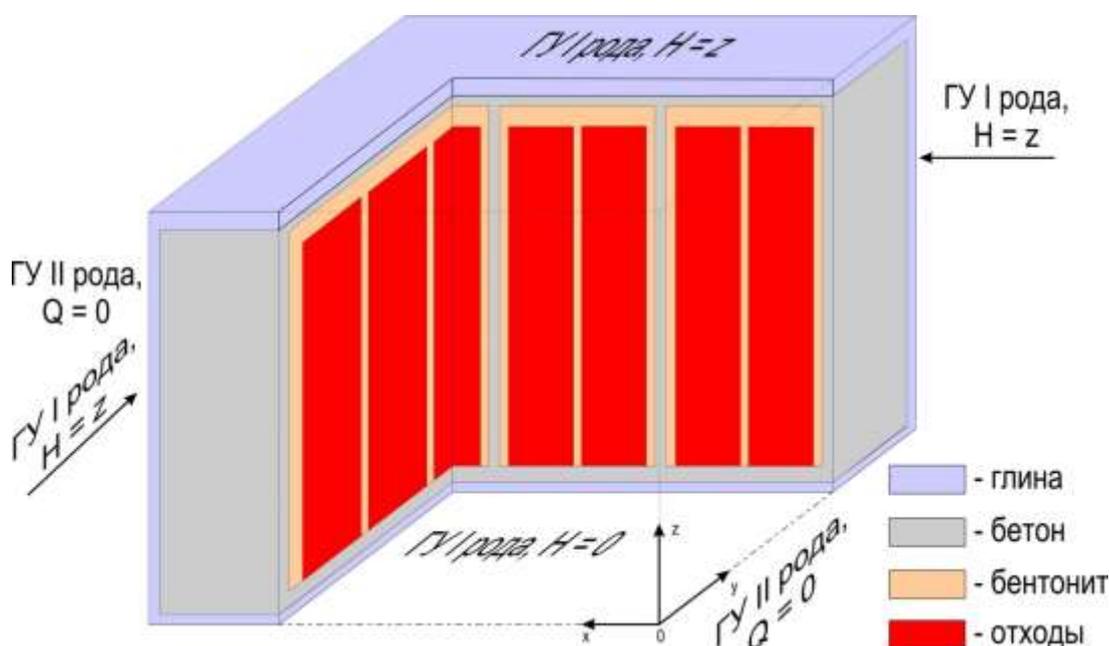


Рисунок 1. Схема модели отсека сооружения, соответствующая модельному сценарию 1.

Модельный сценарий 2 (рис. 2) соответствует аварийному сценарию 1, при котором происходит нарушение целостности защитных экранов в верхней части сооружения. Условия на границах фильтрационной модели соответствуют модельному сценарию 1:

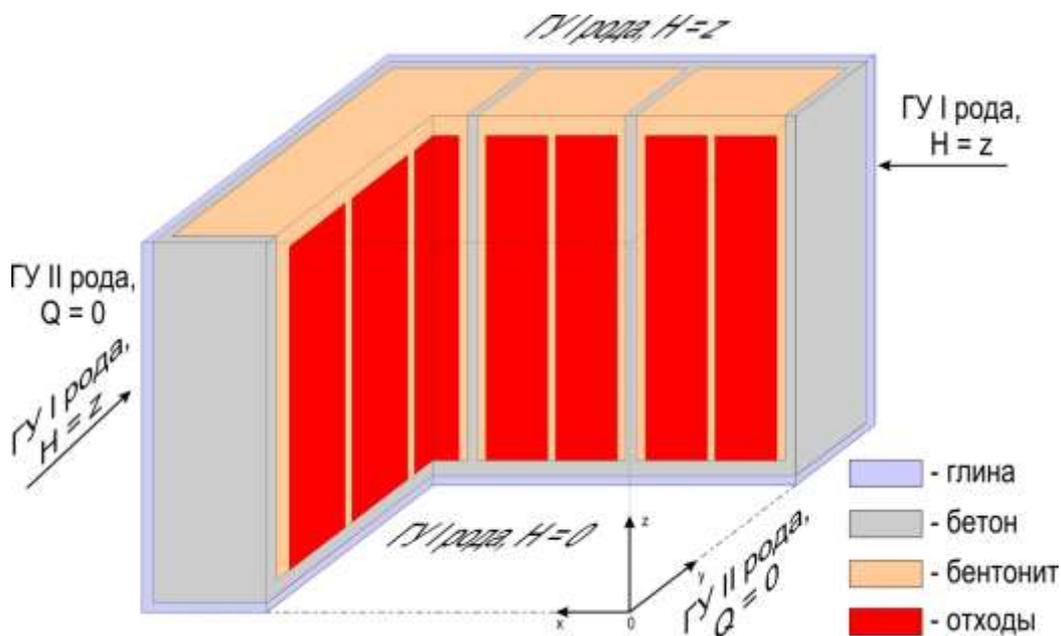


Рисунок 2. Схема модели отсека сооружения, соответствующая модельному сценарию 2.

Модельный сценарий 3 (рис. 3) также соответствует аварийному сценарию 1, при котором происходит нарушение целостности защитных экранов в верхней и нижней частях сооружения. В отличие от модельного сценария 2, в нижнем слое глинистого экрана задано окно с высокой проницаемостью. Условия на границах фильтрационной модели соответствуют модельному сценарию 1:

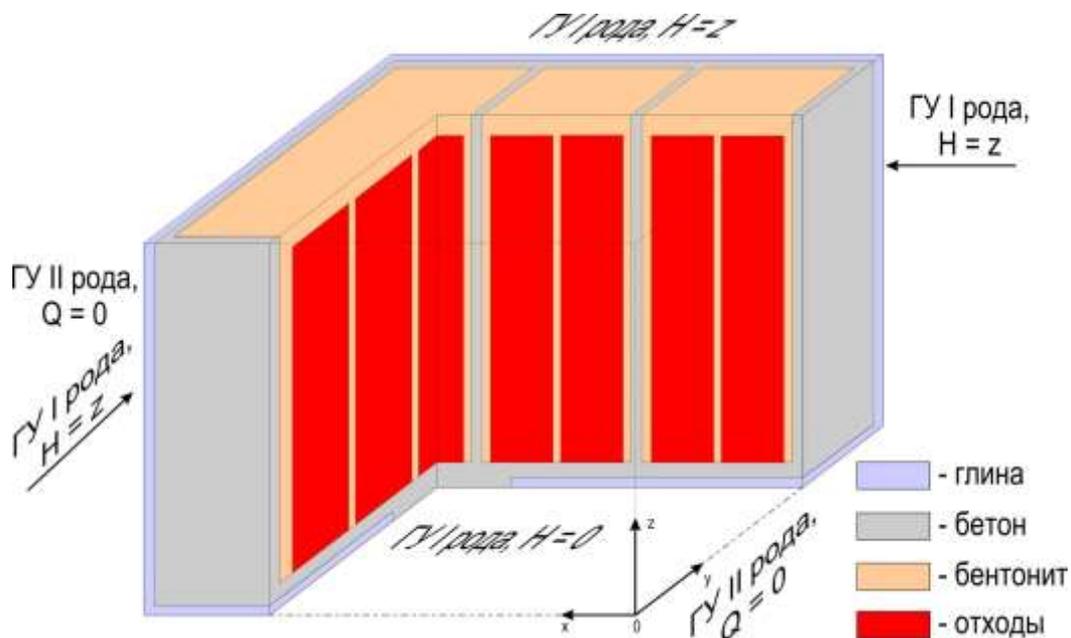


Рисунок 3. Схема модели отсека сооружения, соответствующая модельному сценарию 3.

Модельный сценарий 4 (рис. 4) соответствует аварийному сценарию 2, при котором происходит подтопление сооружения за счёт подъёма уровня подземных вод. Защитные экраны из глинистых материалов остаются ненарушенными.

Так как в данном сценарии моделируется распространение загрязнения за счёт подтопления сооружения, верхняя граница модели задана как граница II рода с нулевым расходом. На внешних боковых границах задано граничное условие I рода, причём в нижней (заглублённой) части задан напор соответствующий уровню земной поверхности, а в верхней — напор равный высоте ячейки над основанием сооружения.

Заданные на геофильтрационной модели различные граничные условия позволили смоделировать движение воды внутри сооружения при различных вариантах его эволюции. Полученная структура потока легла в основу дальнейших работ по геомиграционному моделированию потенциального распространения загрязнения.

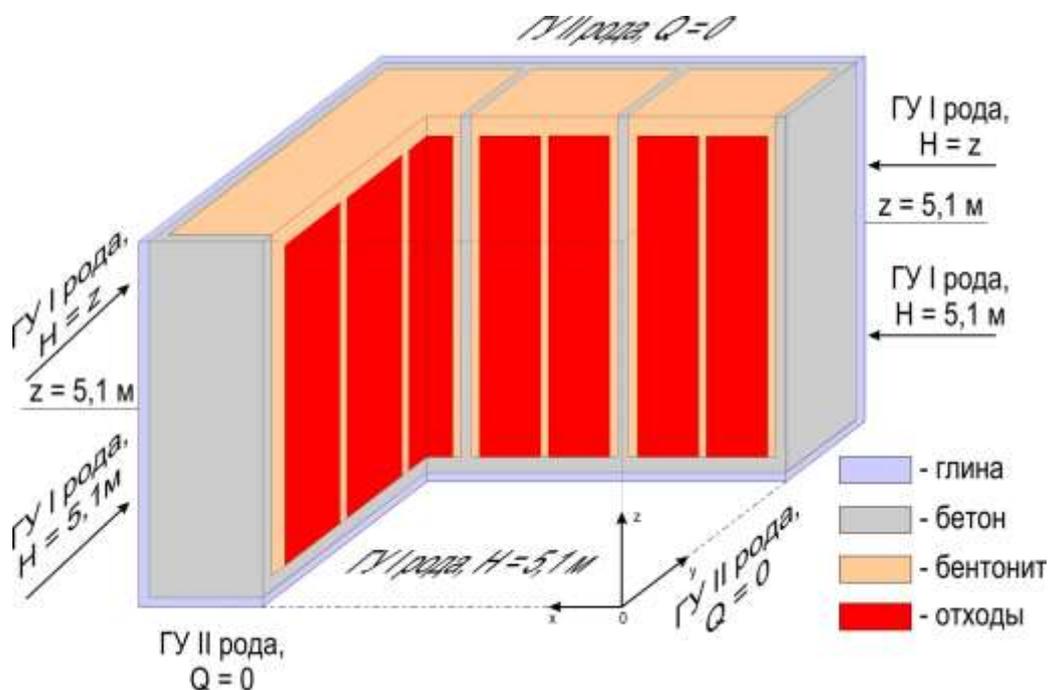


Рисунок 4. Схема модели отсека сооружения, соответствующая модельному сценарию 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ K_d ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ НА ПРОЕКТИРУЕМЫХ ОБЪЕКТАХ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО

Т.Г. Шимко, М.Л. Кулешова, Н.Н. Данченко

При захоронении радиоактивных отходов (РАО) используются инженерные барьеры безопасности (ИББ), материалом для которых служат бентониты и глинистые грунты. Оценка поглощающих свойств глин в отношении захораниваемых радионуклидов является одной из основных задач предпроектных исследований. Параметры процесса поглощения используются при прогнозном моделировании миграции радионуклидов.

Для одного из проектируемых объектов захоронения РАО в ЛОГС исследовались бентониты и глины местных месторождений в качестве материалов для ИББ. На основе полученных данных по сорбционным свойствам грунтов с помощью математического моделирования был сделан прогноз выхода радионуклидов за пределы объекта захоронения во времени. В данном докладе рассматриваются вопросы получения достоверных параметров сорбции, наилучшим образом отражающих процессы массопереноса в природных глинистых грунтах.

При моделировании миграции загрязняющих веществ в геологической среде одним из главных параметров, описывающих сорбционное взаимодействие растворенных в воде элементов-загрязнителей с грунтами, является коэффициент распределения K_d . В простом выражении это отношение количества загрязнителя, адсорбированного на твердой фазе (грунте) к его концентрации в растворе при контакте раствора с грунтом. Этот коэффициент является неотъемлемой частью современных методов моделирования переноса загрязняющих веществ и радионуклидов и анализа рисков.

В качестве материалов для создания внешних барьеров безопасности по внешнему контуру сооружения в данном случае рассматриваются 2 разновидности глинистых грунтов: ожелезненная глина и каолиновый суглинок. Их основные характеристики, влияющие на сорбционные свойства, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики образцов, определяющие их сорбционные свойства

Материал	Содержание фракции <0,01мм, %	Содержание сорбирующих минералов, %			ЕКО, мэкв /100г грунта	
		сметит+ смешано-слойные	каолинит	гидрослюда		
Глина ожелезненная	58	2+9	4	4	13	24
Суглинок каолиновый	26	-	53	0,8	-	8

По разработанной и используемой в ЛОГС методике при получении параметров сорбционного взаимодействия загрязнителя с грунтом используется раствор, отобранный непосредственно на объекте и включающий все компоненты, присутствующие в отходах или грунтовой воде. При этом не возникает вопроса о сопоставлении затем лабораторных и натуральных условий. В данном случае были доступны только глинистые грунты, которые планировалось использовать в качестве материалов барьеров безопасности.

Потенциальные загрязнители были представлены набором из 7 катион-образующих элементов – радионуклидов, которые могут присутствовать в захораниваемых отходах. Анионообразующие элементы здесь не рассматриваются, т.к. практически не сорбируются. Условия, которые возникнут на этом объекте через 100 лет (когда, по проекту, начнется миграция радионуклидов, а именно, после начала поступления в хранилище атмосферных вод) моделировались нами в ходе исследований. Растворы исследуемых элементов готовились на модельной воде, имитирующей состав грунтовых вод района проектируемого объекта. Состав модельной воды в мг/л: Na - 68; Mg - 7; Ca - 7; HCO₃ - 186; Cl - 11; SO₄ - 10; pH 6,65.

Определение K_d проводилось для условий растворения элементов, которые могут присутствовать в отходах и выходить во внешнюю среду (сначала во внутреннюю среду хранилища), при поступлении туда воды, имеющей состав природных грунтовых вод данного района.

Исследования проводились в отношении стабильных изотопов Cs и Sr; низкоактивных изотопов U-238 и Th-232, стабильных элементов-имитаторов: радионуклидов Ba (аналог Ra-226), Nd (аналог Pu(III)) и Dy (аналог Am-241, Cm-244). Условно далее называем их «имитаторы». Концентрации исходных растворов по каждому элементу составляли 0,01; 0,1; 1,0; 10 мг/л.

Параллельно с исследованиями ЛОГС, изучение сорбции на этих глинах проводили в лаборатории радиохимии химфака МГУ. Они вели исследования на радиоактивных элементах и определяли K_d по активности. Соответственно, там использовались гораздо более низкие концентрации элементов, отличающиеся от наших исследований на имитаторах на 5-6 и более порядков (Табл. 2).

Концентрации радионуклидов в опытах по сорбции в статике

Нуклид	Концентрация	
	моль/л	Бк/л
Cs	2,6E-10	115714,3
Sr	8,7E-13	использован Sr ⁻⁸⁵
Am	1,3E-08	400000,0
Pu	1,6E-08	9016,2
Np	1,4E-06	8824,1
U	4,5E-10	использован U ⁻²³³

Существуют 2 основных метода определения K_d .

- 1) В статических условиях, когда навеска глинистого материала заливается раствором исследуемого элемента известной концентрации и после выдержки в течение определенного времени определяется остаточная концентрация элемента в растворе. Берется несколько заданных концентраций раствора и по результатам опытов строится изотерма сорбции: зависимость количества поглощенного твердой фазой (грунтом) элемента от остаточной концентрации его в растворе.
- 2) В динамических условиях на колонках. Вы это знаете, это неоднократно докладывалось, останавливаться не будем.

Этими двумя методами нами определялись K_d . На кафедре радиохимии химфака (на радионуклидах) K_d определяли только в статических условиях.

В статике сначала исследовалась кинетика сорбции, было определено время, после которого концентрация раствора не менялась. Это время составило 1 сут. Построены изотермы сорбции для каждого из 7 элементов, по которым рассчитаны K_d . Концентрации растворов были 0,01; 0,1; 1; 10 мг/л (по каждому элементу). На рис. 1 приведены примеры полученных изотерм для ожелезненной глины.

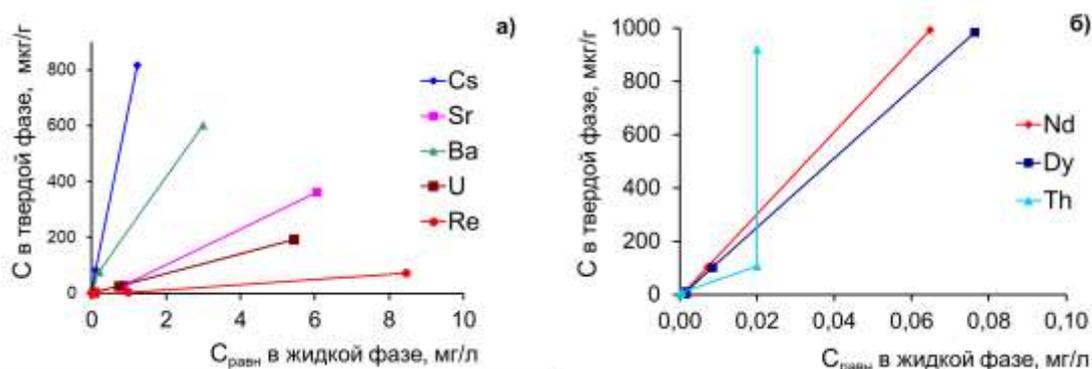


Рис. 1 Изотермы адсорбции (иммобилизации) на образце глины ожелезненной:
а) слабогидролизующих ионов (группа I); б) склонных к гидролизу ионов (группа II).

В ходе определений выделены две группы элементов – слабогидролизуемые (Cs, Sr, Ba, U) и склонные к гидролизу (Nd, Dy, Th). Склонные к гидролизу элементы образуют гидроокислы при концентрации раствора выше 0,1 мг/л, что затрудняет отделение количества адсорбированного элемента от выпавшего из раствора в виде гидроокисла. Процесс гидролиза исследовался отдельно. K_d , полученные в статике на имитаторах и радионуклидах, приведены в таблице 2.

Опыты в динамике проводились на колонках с постоянной скоростью фильтрации раствора. По результатам экспериментов на колонках были построены «выходные кривые» для Sr, Cs, Ba, Nd, Dy, U и Th, которые представлены на рис. 2 и 3. На этих же графиках показано изменение pH в ходе экспериментов.

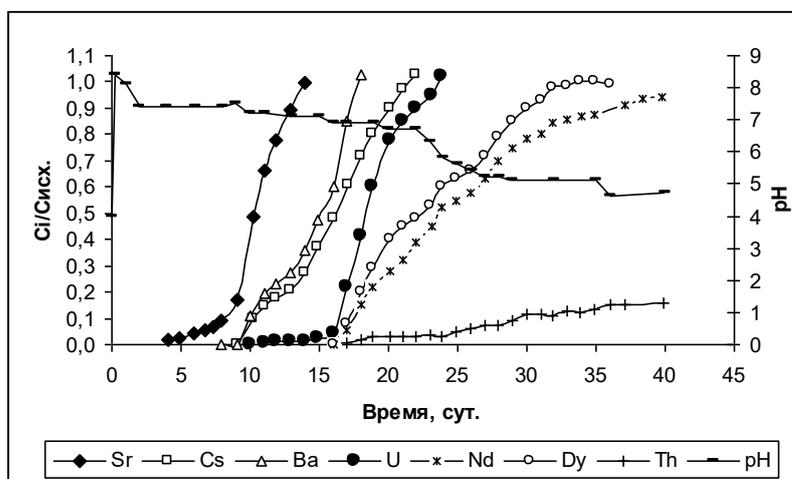


Рис. 2 Выходные кривые на ожелезненной глине

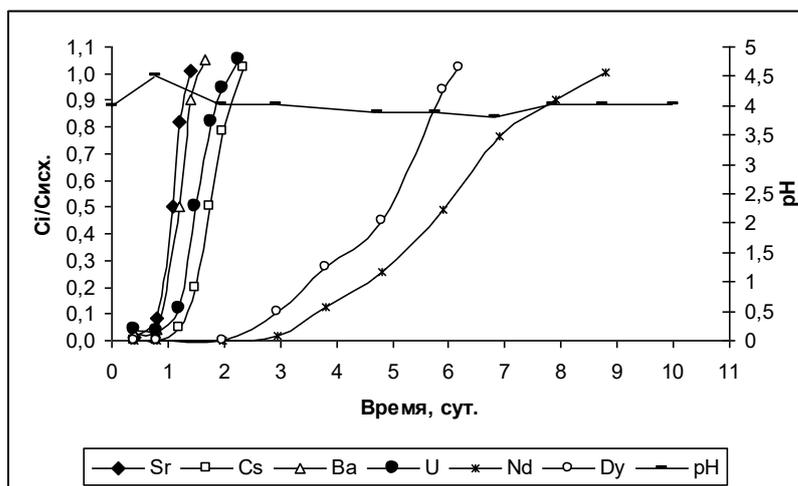


Рис. 3 Выходные кривые на каолининовой глине

Выходные кривые (изменение концентрации раствора на выходе из колонки с грунтом) позволяют наглядно рассмотреть процесс поглощения элементов из многокомпонентного раствора. На ожелезненной глине опыт до выхода концентрации

элементов на исходное значение продолжался в течение 40 сут. Из присутствующих в растворе элементов первым вышел на исходную концентрацию Sr, демонстрируя наименьшую из всех элементов способность к поглощению. Затем последовательно достигли исходной концентрации Ba, Cs и U. Как видно, концентрация Th на выходе из колонки с ожелезненной глиной за время эксперимента 40 суток достигла лишь 0,1 по $C_{отн.}$. За это время через образец объемом 5,6 см³ профильтровалось 6,7 л раствора. Так как ожелезненная глина обладает высоким ощелачивающим действием (рН водной вытяжки 9,5), это вызывает выпадение гидроокислов Th до тех пор, пока не будет нейтрализован рН природными водами.

На каолиновом суглинке процесс поглощения 6 элементов завершился в течение 9 сут. Торий в течение этого времени полностью поглощается (в опыте на ожелезненной глине торий появился в растворе только на 16 сут.). В обоих опытах первым выходит Sr. В целом, ожелезненная глина обладает значительно более высокой поглощающей способностью в отношении исследованных элементов.

По выходным кривым также были рассчитаны значения K_d для каждого исследованного элемента. Для расчетов использовалась модель микродисперсии в гомогенной среде, предложенная В.М Шестаковым (Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М., Изд-во МГУ, 1995. 369с.). В табл. 3 приведены полученные значения в графе «динамика».

Таблица 3

Значения K_d , полученные в статических и динамических условиях

Элемент	Ожелезненная глина			Колиновая глина		
	K_d , мл/г			K_d , мл/г		
	имитаторы	радионук.	динамика	имитаторы	радионук.	динамика
Cs	$6,7 \times 10^2$	$7,1 \times 10^4$	$2,8 \times 10^2$	$2,9 \times 10$	$3,1 \times 10^2$	$3,0 \times 10$
Sr	$6,5 \times 10$	$5,8 \times 10$	$1,8 \times 10^2$	$1,7 \times 10$	$4,6 \times 10$	$2,8 \times 10$
U	$9,2 \times 10$	$3,3 \times 10^3$	$3,3 \times 10^2$	$3,4 \times 10$	$5,3 \times 10^3$	$2,6 \times 10$
Dy (Am/Cm)	$1,3 \times 10^4$	$1,8 \times 10^5$	$4,3 \times 10^2$	$2,0 \times 10^3$	$1,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^2$
Th	осажд	осажд	1,7	осажд	осажд	-
Ba (Ra)	$2,0 \times 10^2$	-	$2,6 \times 10^2$	$2,4 \times 10$	-	$2,0 \times 10$
Nd (Pu III)	$1,6 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$	$3,1 \times 10^3$	$1,1 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$

Несмотря на относительную простоту метода определения K_d в статике, точность получаемых значений не всегда удовлетворительна, за кажущимися элементарными операциями скрываются многочисленные нюансы, приводящие к варьированию данных [EPA, 1991; Roy et al., 1991; Serne and Relyea, 1981]. Одно из наиболее полных исследований по оценке точности и выявлению важных процедурных деталей было проведено девятью лабораториями США [Serne and Relyea, 1981]. Лаборатории-участники определяли K_d трех элементов: цезия, плутония и стронция в одинаковых условиях. Полученные значения K_d разнились у цезия и плутония до трех порядков, а стронция - находились в пределах одного порядка. Авторы пришли к выводу, что причина изменчивости значений K_d для плутония и цезия связана с рядом факторов, которые обычно не контролируются, а именно: методом добавления реактивов, соотношением раствора и твердого вещества, начальной концентрацией раствора, методом отделения растворов, температурой. Анализ этих факторов лег в основу методических рекомендаций EPA по проведению экспериментов в статике [Contaminant Geochemistry and K_d Values. Vol. I-III. 1999], однако, они носят только рекомендательный характер, так как в каждом конкретном эксперименте необходимо учитывать особенности химических элементов и сорбентов (грунтов), на которых проводится исследование.

Выполненные экспериментальные определения K_d для 7 элементов: Cs, Sr, U, Dy (аналог Am/Cm), Th, Ba (аналог Ra), Nd (аналог Pu III) при взаимодействии с двумя разновидностями глинистых грунтов позволяют сравнить значения коэффициентов распределения, полученные в трех вариантах опытов: в статических и динамических условиях, с использованием неактивных изотопов и имитаторов, а также активных радионуклидов. Наилучшая сходимость полученных значений наблюдается у неодима Nd (имитатор плутония PuIII) и плутония. Величины K_d практически не отличаются в статике и динамике, а также полученные на имитаторе (Nd) и на активном изотопе Pu. В других случаях разброс значений может составлять от 1 до 3 порядков и это зависит как от элемента, так и от глинистого материала.

Полученные результаты позволили оценить возможный разброс значений K_d , определяемых различными методами, и использовать при математическом моделировании миграции элементов в глинистом грунте те значения, которые наилучшим образом отражают природные и моделируемые условия.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОФИЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
В ЗАДАЧАХ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ /
ПРОГРАММА PERFIL V.4 (CROSSNET)

М. В. Лехов

Профильная постановка моделирования фильтрации исходит из задачи определения характеристик гидродинамического поля потока в плоскости разреза, благодаря воспроизведению геометрии слоев и подземных сооружений. Значительно расширяются возможности моделирования в задачах инженерной гидрогеологии, которые связаны со свободной поверхностью. На основе решения могут быть получены производные характеристики – скорости, давления, гидродинамической силы, расхода потока. Из решения профильной задачи фильтрации следует оценка подтопления, заболачивания, подпора водоема, высачивания, устойчивости склонов и сооружений, фильтрационных потерь из водохранилищ или хранилищ отходов, загрязнения и других явлений.

Профильные задачи – крупномасштабные, локальные. Расчет производится по линии планового тока, полученной из карты гидроизогипс или изолиний напоров, полученных по результатам планового моделирования, наметившего картину течения, но не способного учесть отмеченные выше особенности.

Особенно эффективно и традиционно применение профильных моделей при проектировании противофильтрационных и дренажных мероприятий на объектах, подверженных силовому воздействию потока грунтовых вод [6]. Продуктивно использование в нестационарных задачах подтопления или осушения прибрежных земель.

Привлекательной стороной является возможность задания шпунтов и завес неполного вскрытия неоднородного пласта, ряда несовершенных дренажных скважин, несовершенного по врезу и кольматации водоема, туннеля (которые могут быть проложены под водоемами) - задачи непригодные для плановых расчетов фильтрации. На профильной модели с гораздо большей достоверностью, чем на плановой, может быть выявлено поведение свободной поверхности потока при пересечении слоев, отрыве от ложа водоема, осушении дренажа, подтоплении поверхности земли. Для нестационарных задач профильная модель в таких случаях особенно актуальна

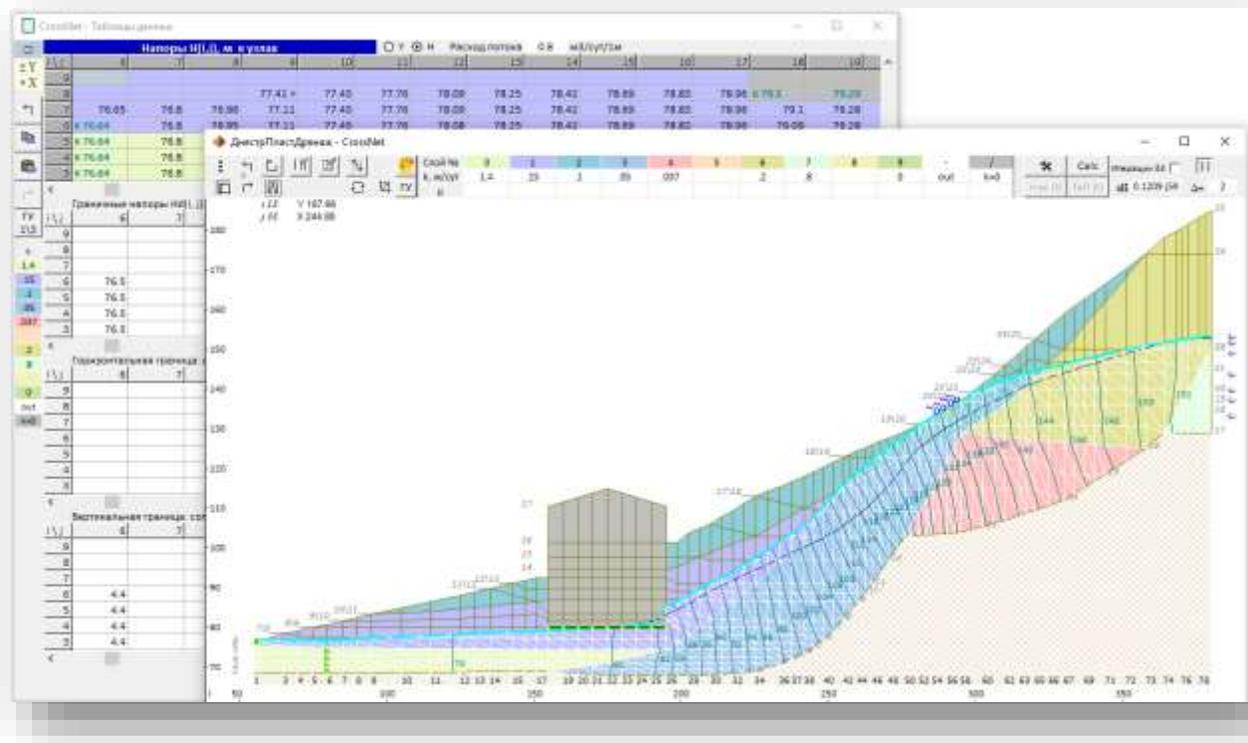


Рис. 1. Интерфейс программы PERFIL v.4 (CrossNet) с результатами расчета безнапорного потока в оползневом склоне. Ряд вертикальных дренажных скважин на пойме, пластовый дренаж в основании здания, высачивание на склон.

Профильная модель дает возможность непосредственным образом воспроизводить слои разреза с параметрами проницаемости и емкости, дамбы, насыпи и экраны, учитывать сложные случаи залегания и выклинивания слоев. Задание граничных условий с фиксированными напорами или расходами производится в требуемом интервале разреза или на поверхности земли. В плановых же моделях для учета несовершенных дрен применяются фильтрационные сопротивления, которые не всегда можно правильно рассчитать для неоднородного разреза и неизвестной заранее свободной поверхности.

Определение положения криволинейной свободной поверхности как границы области фильтрации, - причем заранее неизвестной, - является главным преимуществом профильной постановки задачи, учитывая, что поверхность может пересекать разные по параметрам и ограниченные по простиранию слои, высачиваться на поверхность земли и подпирать сооружение и дно водоема.

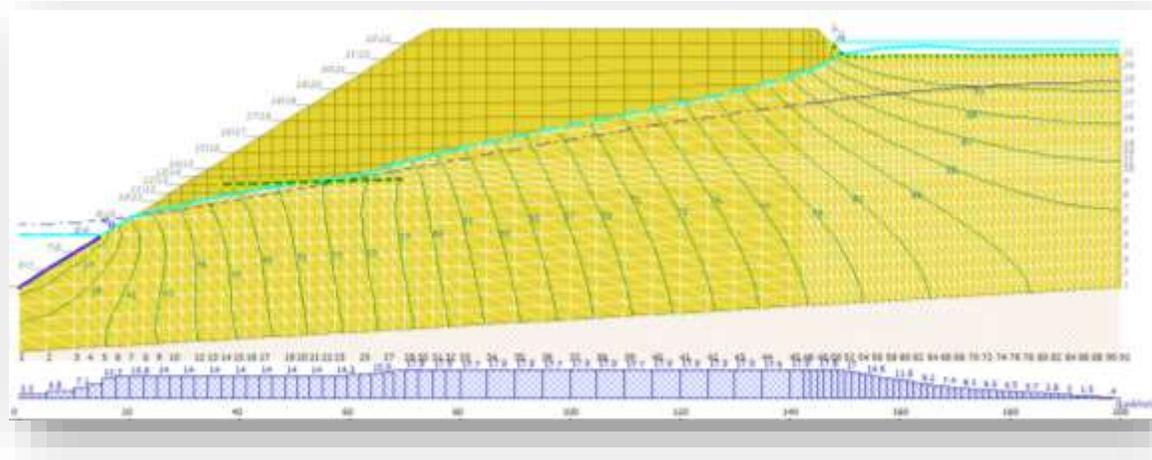


Рис. 2. Фильтрация через дамбу. Отрыв потока от экранированного дна бассейна. Частичное осушение ряда горизонтальных дренажных скважин. Внизу эпюра расхода потока.

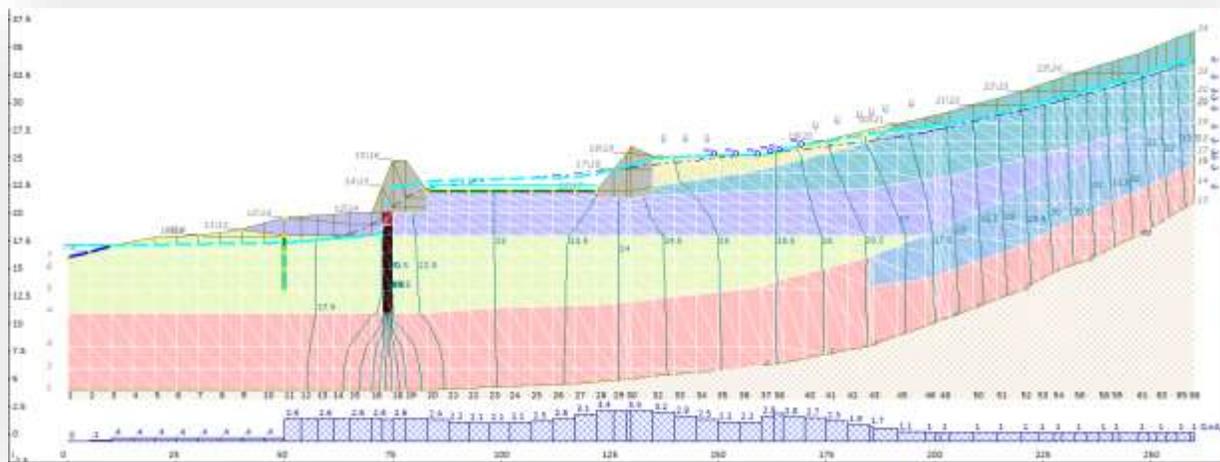


Рис. 3. Поток в подножье горного склона. Подтопление поверхности хвостохранилища горнообогатительного комбината. Локальная инфильтрация пульпы. Водообмен через экранированное дно бассейна. Противофильтрационная завеса. Ряд вертикальных дренажных скважин.

Программа профильного моделирования PERFIL [1] создавалась, исходя из намерения, обеспечить геолога программной системой с автоматическим выполнением операций, связанных с нахождением свободной поверхности потока, участков подтопления, подпора водоемов.

В качестве метода решения двумерной задачи фильтрации использован метод конечных элементов МКЭ [4, 5]. Метод использует сетку элементов, с помощью которых достигается точная аппроксимация разреза в случаях с наклонным залеганием. Этим он выгодно отличается

от метода конечных разностей со ступенчатым заданием границ. Главным достоинством конечноэлементной сетки является возможность описывать свободную поверхность потока. Как подвижная искомая граница она имеет положение, заранее неизвестное.

Алгоритм автоматической перестройки элементов под свободной поверхностью вплоть до полного вырождения треугольников в линию и точку, используемый в программе, обеспечивает плавный и быстрый итерационный процесс решения. Ключевым моментом является начальная разбивка разреза на блоки вертикальными линиями в характерных сечениях – выклинивание слоя, изгиб рельефа, водопора, сооружение, урез водоема. Другое семейство образующих – горизонтали и наклонные линии – повторяют границы слои. Итерационный процесс трансформирует сетку и выстраивает стороны треугольников вдоль искомой свободной поверхности, трансформацию и вырождение треугольных элементов в зависимости от ее положения. Метод конечных разностей в этой задаче не обеспечивает сходимости решения.

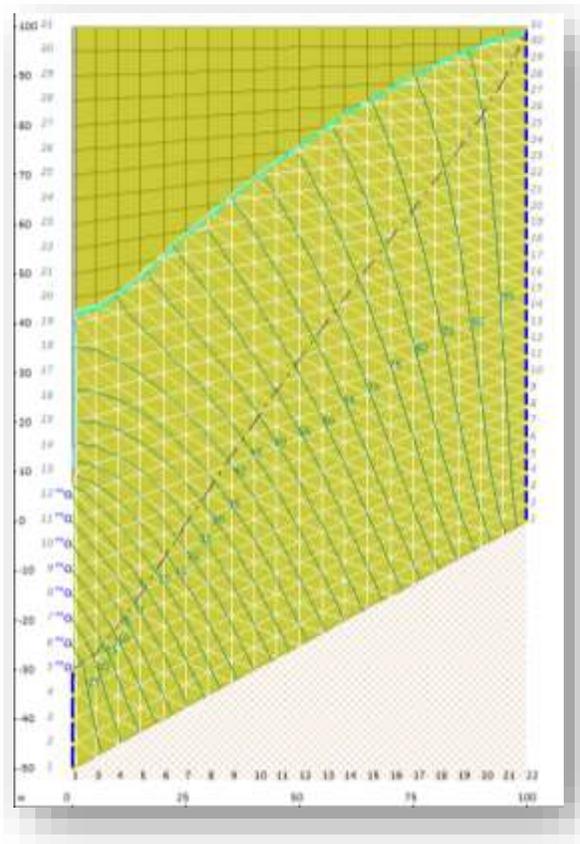


Рис. 4. Учебный тестовый пример: поток на наклонном водопоре с разнородными условиями на границе и деформацией поля напоров по вертикали. Сверху вниз на левой границе: непроницаемая стена, участок высачивания $H=y$ (знак родника), подводный контур $H(y)=const$ (синяя вертикаль). На свободной поверхности (сплошная кривая) ордината

определяется напором на ней $y=H$. Штрихпунктирная линия – поверхность напоров вдоль водоупора.

Существенным препятствием использованию МКЭ долгое время являлась потребность в большой оперативной памяти компьютера для массивов параметров и коэффициентов решаемой матрицы, размер которой находится в квадратичной зависимости от количества узлов сетки. Поэтому разработан прием уплотнения матриц в процедуре исключения Гаусса. Разработанная модификация метода Гаусса на больших сетках дает заметный выигрыш по скорости, учитывая, что нелинейность задачи и граничных условий требует применения итерационного счета.

Программа PERFIL создавалась вслед за программой конечноэлементного моделирования плановой нестационарной фильтрации TETRAGON. Разработка программы профильного моделирования осуществлялась, исходя из реальных потребностей проведения прогнозных и разведочных расчетов на проектируемых или реконструируемых гидротехнических, теплоэнергетических, горнодобывающих и городских объектах в самых разнообразных природных условиях. В процессе работы учитывались возникающие потребности в моделировании дополнительных случаев и в удобстве операторской работы.

Список литературы

1. Лехов М. В., 2014. PERFIL программа моделирования профильного потока подземных вод со свободной поверхностью. Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ), № 9, с. 2014618017.
2. Лукнер Л., Шестаков В.М., 1976. Моделирование геофильтрации. Недра, Москва, 407 с.
3. Шестаков В.М., Жернов И.Е., 1971. Моделирование фильтрации подземных вод. Недра, Москва, 223 с.
4. Liu P.L.E., Liggett J.A., 1978. An efficient numerical method of two-dimensional steady groundwater problems. Water Resour. Res. 14(3), 385-390.
5. Neuman S.P., Witherspoon P.A., 1971. Analysis of nonsteady flow with a free surface using the finite element method. Water Resour. Res. 7(3), 611-623.
6. Rulon J.J., Freeze R.A., 1985. Multiple seepage faces on layered slopes and implication for slope stability analysis. Canad. Geotechn. J. 22(3), 347-356.

МЕРЗЛЫЕ ТОЛЩИ ШЕЛЬФА МОРЕЙ ЛАПТЕВЫХ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.В. Гаврилов, В.В. Малахова*, Е.И. Пижанкова

* *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН*

Более 20 лет назад, в конце 1990-х годов представления о мерзлоте морей Лаптевых и запада Восточно-Сибирского были весьма разноречивыми. Они варьировали от невозможности формирования мерзлых пород в силу солености поровых вод в 30 % (мнение Жигарева [4] - одного из самых первых исследователей субмаринных мерзлых пород), до мерзлоты километровой мощности при сплошном ее распространении [9]. Ниже представлены материалы исследований последних десятилетий, изменившие фактологическую базу исследований субмаринной мерзлоты.

Уже на рубеже XX и XXI вв. синтез результатов морских немецко-российских исследований по программе «Система моря Лаптевых» с региональными буровыми отечественными данными позволили сформировать новые представления о криолитозоне шельфа. Это область со сплошным распространением мерзлых толщ от береговой линии до изобаты 60 м, прерывистым и островным их развитием в интервале глубин моря 60-120 м [7, 8]. Оценить валидность этих данных в 2000-е гг. было невозможно. Например, в 2020 г., выводы о возможном отсутствии мерзлоты на изобатах 40, 20 и даже 5 м на севере Восточно-Сибирского шельфа близ о. Беннетта (о-ва Де Лонга), проверить также было невозможно. Исследования, выполненные с помощью численного моделирования, были проведены нами в связи с регистрацией здесь в 1970-х – начале 2000-х гг. мощных извержений газов, достигавших берегов Аляски. Задание высокого (75 мВт/м^2) теплового потока из недр обуславливалось данными [11], которые подкреплялись активным проявлением процессов геодинамики (горный характер надводного и подводного рельефа, густая сеть разломов, почти полное отсутствие рыхлых четвертичных отложений, сейсмическая активность и, наконец, мощные извержения газов).

В настоящее время возможность такой проверки есть. Она вытекает из выявления обширных площадей отсутствия мерзлоты или ее островного распространения на севере морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, начиная с глубин моря 60-50 и 20-60 м соответственно и заканчивая бровкой шельфа [1, 2, 3] (рис.1). Выяснилось, что в пределах поднятия Де Лонга тепловой поток измерен в пяти пунктах. Его плотность варьирует от 66 до 123, при среднем значении 91 мВт/м^2 . Таким образом, можно считать, что донные породы даже вне зон разломов в районе островов Де Лонга, где море вскрывается ото льда практически всего на один месяц, характеризуются преимущественно талым состоянием.

Указанная площадь отсутствия и/или островного распространения мерзлоты установлена по сейсмическим данным, полученным методом общей глубинной точки (МОГТ). Эта обширная область может использоваться для тестирования палеогеографического сценария при численном моделировании или валидности его результатов. Стало ясно, что минимизация мощности мерзлоты во внешней области указанных шельфов связана не только с кратким временем промерзания и ранним их затоплением. Основная причина, скорее всего, - это высокий тепловой поток и эмиссия метана из недр. И это не бактериальный метан, не разлагающиеся газогидраты в связи с деградацией мерзлоты, как полагают Н.Е. Шахова и И.П. Семилетов [12], а термогенный (катагенетический) – свидетельство высокой газоносности структур моря Лаптевых. Источником метана, по мнению В.И. Богоявленского, являются глубинные залежи углеводородов, откуда газ мигрирует к поверхностным горизонтам по сети разломов.

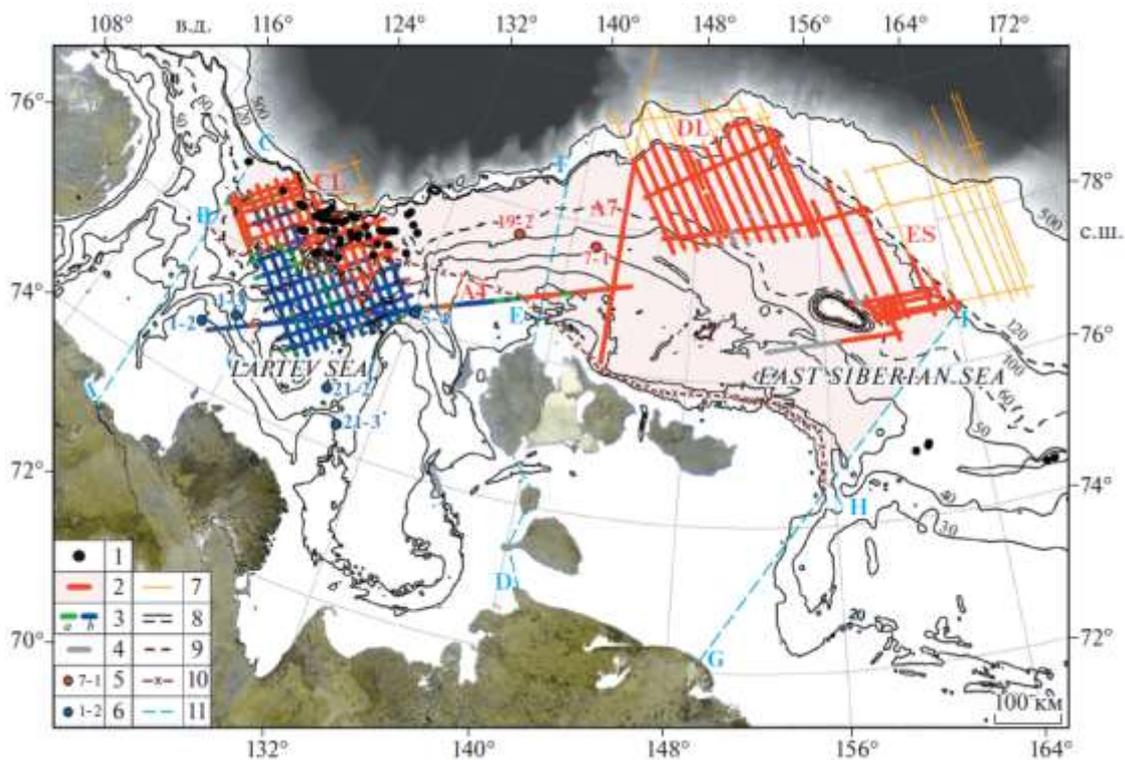


Рис. 1. Фактические данные и зона островного развития мерзлых пород по результатам сейсмического профилирования на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского [3]: 1 – сипы газа; 2 и 3 – отсутствие (2) и наличие (3) сейсмических свидетельств существования мерзлых пород; 4 – сейсмические волны неясного генезиса; 5 и 6 – отсутствие (5) и наличие (6) мерзлых пород по данным донных сейсмостанций; 7 – сеймопрофили на глубинах моря свыше 120 м; 8 – изобаты, м; 9 и 10 – прогнозируемые границы распространения мерзлых пород: 9 – уверенные; 10 – требующие дополнительных исследований; 11 – границы исследуемого шельфа.

Подводя итог мерзлотным исследованиям на севере восточно-сибирских морей, необходимо отметить, что современный этап изучения криолитозоны характеризуется фактическими данными на широтах 76-79°с.ш. весьма высокой степени достоверности. Такими данными восточно-сибирский шельф ранее не обладал.

Новые данные получены также по результатам применения электроразведочных методов. Под Хатангском заливом и акваторией бухты Нордвик в ходе региональных электроразведочных работ методами магнитотеллурического зондирования и зондирования становлением поля Д.В. Яковлевым и др. [10] выявлено существование талых пород, прослеживаемое на глубину более 1,5 км. По всей видимости, это сквозной талик. Причиной его существования является, скорее всего, эстуарный характер устьевой зоны р. Хатанги. Эти данные коррелируют с данными об отсутствии мерзлоты в эстуариях рек Оби и Таза. В других местах, прилегающих к указанным водотокам, развиты мерзлые породы. Их кровля заглублена на 250 м, такую же величину имеет мощность мерзлоты. На авандельтах мощность водного речного потока и его отепляющая роль в условиях шельфа Восточной Сибири не столь велика. В этих случаях, как и в периферийных частях Хатангского эстуария формируется только лишь надмерзлотный талик.

А.В. Кошурниковым [5] предложен и апробирован ряд других электроразведочных методов. Это методы зондирования становлением поля и малоглубинные частотные зондирования для изучения ММП на шельфе и в переходной зоне суша-шельф соответственно. Они осуществлялись им в морском варианте с научно-исследовательских судов. Первый из этих методов позволяет выделять кровлю и подошву мерзлой и сцементированной газогидратами толщи. Для каждого сектора российского арктического шельфа выяснена латеральная степень прерывистости и мощность таких нерасчлененных толщ. С помощью малоглубинных зондирований на Приямальском шельфе удалось расчленить мерзло-газогидратную толщу на два слоя.

Важно также отметить, что постепенно удается изживать представления о возможности существования маломощных мерзлых толщ на прибрежном Восточно-Сибирском шельфе, появившиеся еще в 70-е гг. прошлого века. Они в настоящее время продолжают существовать, так как зафиксированы на Геокриологической карте СССР масштаба 1:2 500 000, в пояснительных записках к Государственным геологическим картам масштаба 1:1 000 000. Исследованиями с помощью численного моделирования с заданием свойств пород, полученных в ходе мерзлотно-гидрогеологических работ 1970 г. [6], нам удалось установить, что маломощная мерзлая прибрежная зона и сквозной талик в осевой части пролива Дм. Лаптева - это только верхняя часть разреза криолитозоны в этом месте. Выявлено, что указанное явление является следствием различий в составе пород, слагающих

разрез пролива, степени засоленности поровой влаги, и недостаточной глубинности бурения (рис. 2). Мерзлый прослой – это результат высокой температуры замерзания поровой воды в нем ($-0,2^{\circ}\text{C}$). Кровля нижнего слоя мерзлой толщи может располагаться на 220 м, а подошва – на 440 и 320 м для изобат 5 и 20 м соответственно.



Модель температуры мерзлой толщи, свойственной поддонным глубинам 20 и 5 м.

Рис. 2. Геологический разрез через пролив Дм. Лаптева (А, [6]) и профиль модельной температуры пород в осевой части пролива, свойственной поддонным глубинам 20 (красная линия) и 5 м (зеленая линия) (Б).

Кровля субмаринных мерзлых пород, как правило, всегда заглублена. Заглубление связано в основном с засолением пород, смерзающихся в слое припая с сезонным льдом. Засоление понижает температуру начала замерзания поровой влаги, ускоряя их оттаивание. Ширина припая или зоны ежегодного смерзания льда с дном варьирует от 5 до 15 км. Каждая точка дна в ходе послеледниковой трансгрессии в течение сотен лет находилась в такой зоне, подвергаясь закачке солей в донные породы и их оттаиванию. Величина заглубления оттаявших таким образом отложений не выходит, как правило, за пределы 100 м.

Выводы

1. Фактологическая база данных о мерзлых породах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского пополнилась принципиально важными сведениями об их распространении на севере шельфа. Эти сведения характеризуют наши модели 15-20-летней давности, во-многом экспериментальные, как валидные.

2. Важно, что новые данные получены также и по другим частям шельфа, и что это геофизические данные. Т.е., методика использования сейсмических и электроразведочных данных, которых очень не хватало два последних десятилетия, развивается.

3. Современный этап исследований реликтовой мерзлой толщи характеризуется как принципиально новый. Новизна заключается в том, что для оценки валидности их результатов есть возможность найти необходимые для этого данные.

Список литературы

1. Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 1. С. 70-76.
2. Богоявленский В. И., Кишанков В.И., Казанин А.Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // ДАН. Науки и Земле, 2021, т. 500, № 1, с. 70-76.
3. Богоявленский В. И., Кишанков В.И., Казанин А.Г. Мерзлота и газогидраты на арктическом шельфе Восточной Сибири // ДАН. Науки и Земле, 2022, т. 507, № 1, с. 110-117.
4. Жигарев Л.А. Закономерности развития криолитозоны арктического бассейна // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, ИМ СО АН СССР, 1981, с. 4-17.
5. Кошурников А.В. Применение комплексного геокриолого-геофизического анализа при исследовании многолетнемерзлых пород и газогидратов на шельфе морей Российской Арктики // Геоэкология, 2020, № 3, с. 36-44.
6. Неизвестнов Я.В. Гидрогеология // Объяснительная записка к геологической карте СССР, масштаб 1:1 000 000, лист S-54-55, Л., ВСЕГЕИ, 1999, с. 139-146.
7. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Пустовойт Г.В., Холодов А.Л., Кассенс Х., Хуббертен Х.-И., Ниссен Ф. Распространение субмариной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли, т. 1, № 3, 1997, с. 9-18
8. Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Гаврилов А.В., Елисеева А.А., Типенко Г.С., Холодов А.Л., Романовский В.Е. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене-голоцене на шельфе восточной части евразийской Арктики // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 51-64.
9. Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. Новосибирск: Наука, 1993, 135 с.
10. Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Валясина О.А. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным электроразведочных работ // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 77-95.
11. Davies J. H. (2013), Global map of solid Earth surface heat flow // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, doi: 10.1002/ggge.20271.
12. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Joussupov V., Kosmach D., and O. Gustafsson (2010). Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf, *Science* 327, 1246-1250, DOI: 10.1126/science.1182221.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПОБЕРЕЖЬЯ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

А. Ю. Деревягин

Льдонасыщенные неоплейстоценовые и голоценовые толщи приморских низменностей арктического побережья многие десятилетия являются объектом исследований и научных дискуссий. Эти толщи определяют устойчивость геологической среды и существенно осложняют хозяйственное освоение.

Главной особенностью геологической среды побережья моря Лаптевых является широкое развитие пород ледового (едомного) комплекса. Крупные залежи повторно-жильных льдов (ПЖЛ), образующие в комплексе с вмещающими отложениями обширные покровы, вертикальная мощность которых достигает нескольких десятков метров, связаны с областями преимущественного накопления осадков и сингенетическим типом формирования ПЖЛ. П. А. Соловьев (1959) предложил называть ледовым (едомным) комплексом (ЛК) «особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащевидно залегающий на обширных участках, но неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности» Эти толщи являются рельефообразующими и слагают положительные формы (водоразделы) эрозионно-термокарстового рельефа – «едомы».

По материалам многолетних работ построены схематические карты распространения позднеплейстоценовых и голоценовых ПЖЛ региона и районирования Севера Якутии по развитию термоденудационных процессов (рис. 1, 2). Детальные геокриологические, криолитологические и изотопные исследования разрезов ЛК были проведены на 15 участках: оз. Лабаз (1), оз. Таймыр (2), мыс Мамонтовый Клык (3), Оленекская протока (4), дельта Лены (5), п-ов Быковский (6), о-в Муостах (7), о-в Столбовой (8), о-в Бельковский (9), о-в Котельный (10), Земля Бунге (11), о-в Новая Сибирь (12), о-в Мал. Ляховский (13), о-в Бол. Ляховский (14), урочище Ойгосский Яр (15).

Состав пород слагающих ЛК разнообразен и завит от расположения участка. Это могут быть супесчано-суглинстые отложения в различной степени оторфованности, прослой и линзы торфа, песчаные и гравийные отложения. В разрезах встречаются аллювиальные, пролювиальные, эоловые, нивальные, полигенетические фации. Как правило, трудно выделить какую-то конкретную фацию, в большинстве случаев разрезы представлены достаточно однородной толщей. Общим для всех разрезов являются крупные сингенетические повторно-жильные льды, составляющие до 80-90% объема породы и текстурные льды, образующие характерные поясковые криотекстуры. Вертикальная мощность ПЖЛ на отдельных участках достигает 50-60 м (п-ов Быковский). Ширина жил по верху достигает 7-8 м (Ойгосский Яр). По материалам буровых работ на некоторых участках

хвосты ПЖЛ уходят под воду на 10-15 м (п-ов Быковский, о-в Муостах). Весовая льдистость отложений, как правило, превышает полную влагоемкость грунта и составляет от 60 до 120%. При оттаивании породы имеют текучую консистенцию.

В настоящее время останцы ЛК на побережье моря Лаптевых активно разрушаются. Повсеместно наблюдается отступление берегов, формирование волноприбойных ниш, термоабразия и термоэрозия, ветровая термоэрозия, развитие солфлюкции.

Скорость отступления берегов на разных участках развития ЛК различна и варьирует от 0,5 – 0,6 м/год до 7-9 м/год (Григорьев и др., 2006, Gavrilov, Pizhankova, 2018).

Важной особенностью мёрзлых толщ приморских низменностей является цикличность их строения. Причиной этого большинство исследователей считает цикличность изменений климата. Установлено, что накопление ЛК происходит преимущественно в криохроны, а его деградация (термоденудация) и образование аласного комплекса - в термохроны. На ряде исследованных участков вскрывается несколько разновозрастных генераций ЛК от среднего неоплейстоцена до верхнего неоплейстоцена и голоцена (о-в Бол. Ляховский, о-в Котельный, Ойгосский Яр).

В основании некоторых изученных разрезов побережья моря Лаптевых вскрываются системы песчано-ледяных жил, переходящих или контактирующих (замещающихся по горизонтали) с мощными повторно-жильными льдами позднеплейстоценового ледового (едомного) комплекса. Такие контакты отмечены на Лено-Анабарском междуречье (участок Мамонтовый Клык), в дельте Лены (Курунгнах), на Ойгосском Яру, на острове Большой Ляховский, на острове Котельный (Хомурганнах). Переход от песчано-ледяных жил к полигонально-жильным льдам означает смену фациальных условий формирования ПЖЛ и смену ландшафтных условий. Современные системы песчано-ледяных жил в регионе формируются на Земле Бунге.

Различия ЛК обусловлены не только криостратиграфически, но и различиями изотопного состава подземных льдов. Установлено, что изотопный состав льда ПЖЛ (кислород-18, дейтерий) близок к изотопному составу метеорных вод. Это позволяет рассматривать вариации изотопного состава ПЖЛ как изменения палеотемпературных условий их формирования (зимних палеотемператур), а ледовый комплекс как архив данных для реконструкции палеоклиматических и палеоэкологических условий.

Начавшееся освоение шельфа моря Лаптевых, возрождение Северного Морского Пути, развитие инфраструктуры побережья и арктических островов в условиях продолжающегося потепления климата Арктики требует ускорения исследований геологической среды этого региона, прогноза возможного развития негативных явлений. Деградация ЛК носит необратимый характер.

Список литературы

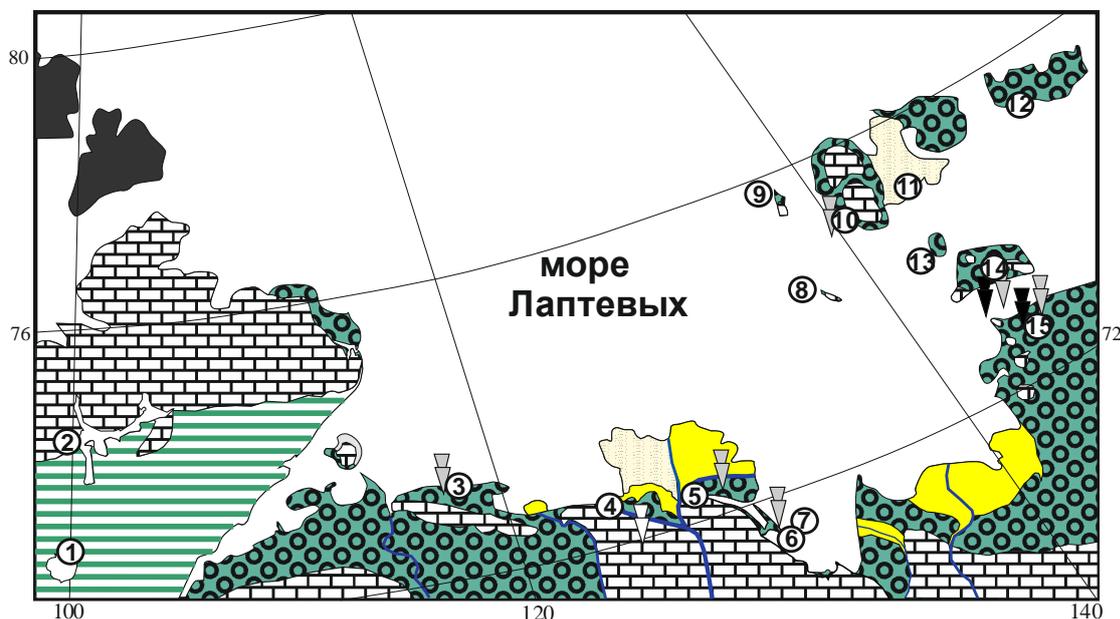
П.А. Соловьев. Криолитозона северной части Ленно-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 142 с.

Григорьев М.Н. и др. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. – 2006. – № 4. – С. 74–95.

A. V. Gavrilov, E. I. Pizhankova (2018) Dynamics of permafrost in the coastal zone of eastern-asian sector of the arctic. *Geography, Environment, Sustainability*, Vol.11, No 1, p. 20-37. DOI-10.24057/2071-9388-2018-11-1-20-37

Рис. 1. Схематическая карта распространения позднеплейстоценовых и голоценовых ПЖЛ района моря Лаптевых

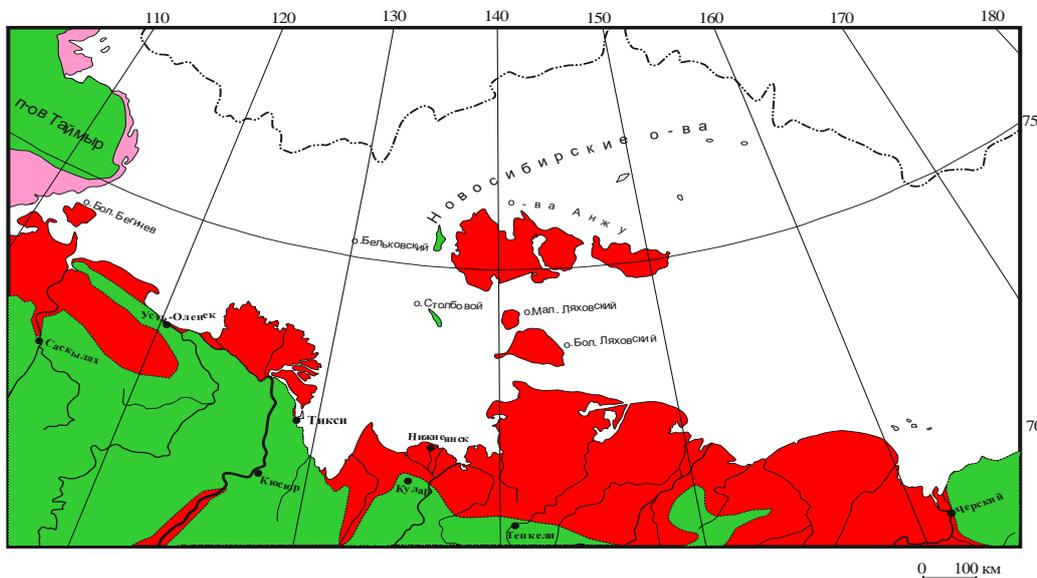
(составлена А. Ю. Деревягиным по материалам: К.А. Кондратьева, 1987; Н.Н. Романовский, 1993; В.В. Куницкий, 2007, М. Н. Григорьев 2012, с дополнениями)



Условные обозначения

- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | 1. Области широкого распространения позднеплейстоценовых ПЖЛ ЛК и голоценовых ПЖЛ аласского комплекса; |  | 7. Участки установленного развития ПЛЖ в подстилающих ЛК песчаных отложениях; |
|  | 2. Области фрагментарного распространения позднеплейстоценовых и голоценовых ПЖЛ в речных долинах и на озерно-аллювиальных террасах; |  | 8. Современные ледниковые покровы; |
|  | 3. Области спорадического распространения позднеплейстоценовых и голоценовых ПЖЛ в депрессиях плато, нагорий и гор; |  | 9. Участок работ и его номер; |
|  | 4. Области широкого распространения голоценовых ПЖЛ в отложениях дельт; | | |
|  | 5. Области фрагментарного распространения позднеплейстоценовых и голоценовых ПЖЛ; | | |
|  | 6. Участки установленного развития ПЖЛ древнего (среднеплейстоценового) ПК. | | |

Рис. 2. Схематическая карта районирования севера Якутии и сопредельных районов по развитию термоденудационных процессов.



- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | Широкое развитие термокарста, термоэрозии, оврагообразования, термоабразии |  | Фрагментарное развитие термокарста, термоэрозии, оврагообразования, |
|  | Спорадическое развитие термокарста на равнинах |  | Спорадическое развитие термокарста в рельефе плато, нагорий и гор. |

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛИГОНАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА И ПОВТОРНО-ЖИЛЬНОГО ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ НА КАРСКОМ ШЕЛЬФЕ

А.В. Гаврилов, Е.И. Пижанкова

Криогенное (морозобойное) растрескивание горных пород и образование в них полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), существенно реже песчано-ледяных жил является одним из самых распространенных криогенных процессов. По наличию псевдоморфоз в разрезах и их проявлению на поверхности и отражающихся на дистанционных данных (полигональный микрорельеф) установлено широкое распространение мерзлоты в перигляциальных областях Евразии и Северной Америки. Однако эта изученность относится исключительно к субэаральным обстановкам. Существенно меньше информации о криогенезе в последний криохрон на шельфе. И практически ничего не известно о развитии ПЖЛ в голоцене в прибрежно-морских обстановках, где криогенное растрескивание осуществлялось в засоленных прибрежно-морских отложениях. Целью настоящего исследования является выявление местоположения участков современных (голоценовых) проявлений указанного процесса в прибрежно-морских условиях и закономерностей их распространения на Карском шельфе.

Основные факторы, определяющие развитие криогенного растрескивания.

Криогенное растрескивание определяется величиной максимальных за год градиентов температуры на поверхности и в слое сезонного оттаивания или промерзания пород. Величина градиента, помимо температуры, обуславливается, в свою очередь, ее годовой амплитудой, составом и влажностью пород. Чем ниже температура, выше ее годовая амплитуда, дисперснее состав и выше влажность отложений, тем интенсивнее проявляется криогенное растрескивание, т.е. его повторяемость, глубина проникновения трещин и частота трещинообразования, выражающаяся в размере полигональной решетки. Северный вариант растрескивания, сопровождающийся проникновением трещины непосредственно в мерзлую толщу и образованием в ней льда [5], обеспечивается следующими температурными условиями. В пылеватых суглинках и супесях формирование ПЖЛ или грунтово-ледяных жил становится возможным при среднемноголетних геотемпературах не выше $-2...-4^{\circ}\text{C}$. В пресных песках подобная возможность реализуется при температурах не выше -5°C ; в пресных малоальдистых гравийно-галечных (дресвяно-щебнистых) отложениях - при температурах не выше $-8...-9^{\circ}\text{C}$.

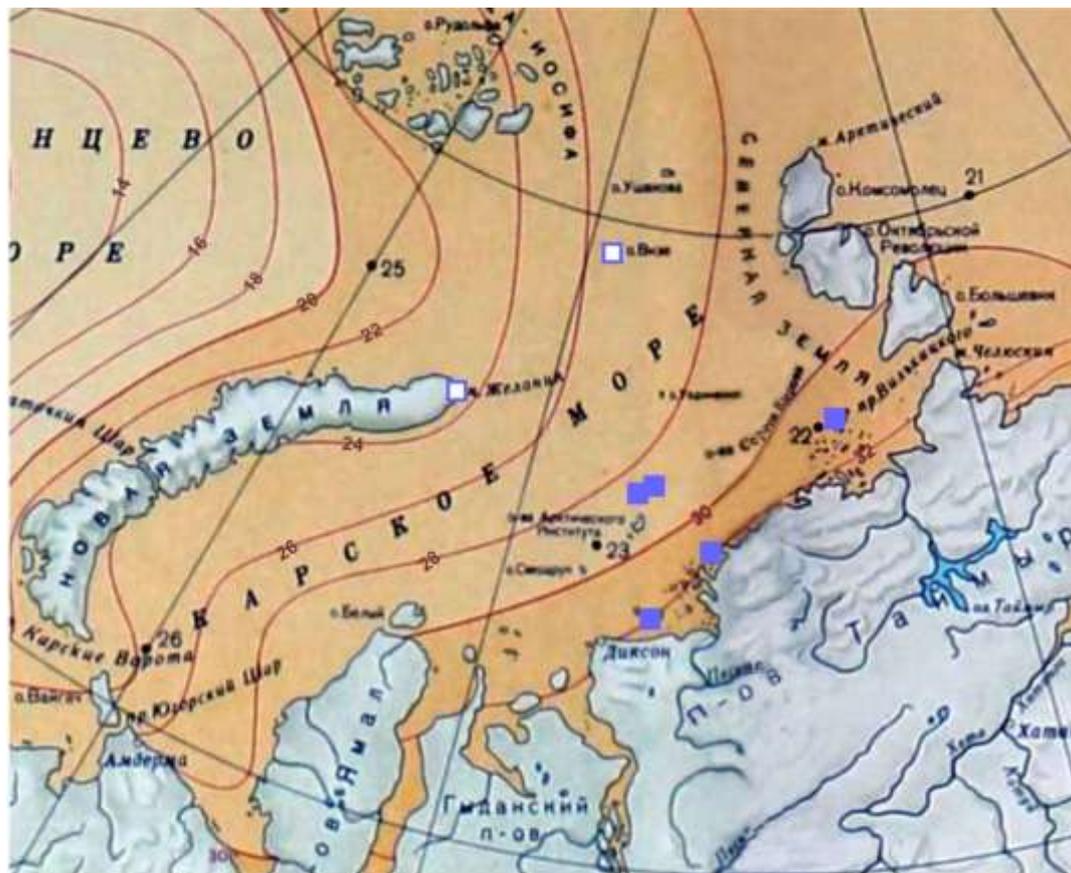
Прибрежно-морским и лагунным условиям свойственны высокое засоление осадков и большая минерализация текстурных льдов. Для первой морской террасы Колымы содержание солей в осадках и льдах согласно данным В.Н. Зайцева [4] достигает 2 % и 4,5 г/л

соответственно. Низовья Колымы, несмотря на расположение вне Карского региона, явились одним из основных опорных участков для установления закономерностей распространения голоценовых ПЖЛ в изучаемом регионе. Здесь выявлено, что в наиболее благоприятных для растрескивания условиях – континентальный тип сезонно-талого слоя (СТС), представленный сильновлажными оторфованными суглинками, супесями или торфом, – в засоленных прибрежно-морских осадках ПЖЛ начинают формироваться при среднемноголетней температуре -11 , тогда как в незасоленных – при -2°C . Здесь установлено, что размер полигональной решетки в засоленных прибрежно-морских отложениях достигает 70-100 м [4], тогда как в незасоленных варьирует от 12 до 25 м.

Материалы. Для исследований использовались глобальное покрытие World Imagery, созданное по космическим снимкам (КС) с пространственным разрешением в панхроматическом варианте 0,3–1,7 м, полученным со спутников GeoEye, WorldView-2,4 за последние годы (2010–2020), с привлечением картографических, литературных и метеорологических данных. Среди них карты среднегодовых температур воздуха и годовых амплитуд температур [1], а также карты, входящие в комплект Государственной геологической карты масштаба 1 000 000 [2, 3]. Это карты литологии морского дна, четвертичных отложений, геоморфологические карты.

Методика. Изучение закономерностей развития повторно-жильного льдообразования предполагает установление его зависимости от среднемноголетней температуры пород, годовой амплитуды колебаний температур на их поверхности, состава и влажности пород. Это – результаты наземных исследований. Поэтому основной подход к изучению перечисленных связей на шельфе заключался в замене указанных параметров сведениями из климатологических справочников и атласов, геологических и топографических карт, литературы. Среди последних немалую пользу приносят сведения зимовщиков на полярных станциях 30-х годов прошлого века. Учет перечисленной информации в процессе анализа космоснимков позволяет делать заключение о распределении снежного покрова, мерзлотно-фациальных особенностях осадконакопления, возможной дисперсности и влажности пород.

Результаты исследований показывают, что наиболее действенными факторами являются температура и амплитуда температур воздуха. Степень благоприятности того и другого фактора для морозобойного растрескивания нарастают с запада на восток. Поэтому его основные проявления фиксируются близ побережья Таймыра. Указанное имеет место на схематической карте (рис.1). Ее картографической основой послужила Карта величины годовых колебаний температуры воздуха у поверхности океана [1].



- - Участки активного формирования ПЖЛ
- - Участки малоактивного формирования ПЖЛ

Рис. 1. Схема расположения участков формирования ПЖЛ на формах голоценовой аккумуляции, показанная на Карте величины годовых колебаний температуры воздуха у поверхности океана [1].

Однако содержание схемы показывает: проявлений развития ПЖЛ очень немного. Основным противодействующим фактором являются скальные породы островов и их рельеф. Во многих описаниях рельеф Притаймырского мелководья называется шхерным. Один из архипелагов так и называется «Шхеры Минина». Ресурс [6] показывает, что острова, проливы, берега континента – это практически неизменные со времени последнего криохрона элементы расчлененного горного рельефа, затопленного в ходе последней трансгрессии моря.

Карты литологии дна [2, 3] характеризуют морское дно, тогда как полигональный рельеф образуется исключительно с внутренней стороны лагун или в пределах их дна, где грунты являются более дисперсными (рис. 2). Дно заполняющейся осадками лагуны – одно из наиболее благоприятных фациальных условий для формирования ПЖЛ.



Рис. 2. ПЖЛ, формирующиеся в процессе осадконакопления в лагуне о. Пологий-Сергеева (острова Известий ЦИК).

На севере центральной (о. Визе) и крайней западной части Карского моря в менее контрастных температурных условиях процесс морозобойного растрескивания нередко выражается лишь в формировании ортогональных по отношению к берегу трещин. Подобные трещины сформировались на мысе Желания (северная оконечность о. Северный Новой Земли). А несколько южнее на этом острове, а также на Земле Франца-Иосифа зафиксированы участки полигонального микрорельефа.

Выводы

1. С помощью ресурса [6] изучены закономерности современного (голоценового) процесса повторно-жильного льдообразования с формированием полигонального микрорельефа на формах прибрежно-морской аккумуляции Карского шельфа.

2. Установлено, что основными факторами, определяющими формирование повторно-жильных льдов, являются низкие среднегодовые температуры воздуха, высокие значения годовой амплитуды температур воздуха, дисперсный состав и высокая влажность отложений внутренних частей лагун.

3. По результатам исследований построена схематическая карта. Ее содержание демонстрирует преимущественную приуроченность ПЖЛ к лагунам и косам северо-восточной части шельфа, характеризующейся наибольшей континентальностью климата. Расчлененный рельеф в этой части моря обуславливает незначительность покрытия островной суши указанными образованиями.

Список литературы

1. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Л., 1980.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист Т-45-48 – м. Челюскин. Объяснительная записка. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2013, 568 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист S-44 Диксон, S-45 Усть-Таря. Объяснительная записка. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2020, 450 с.
4. Зайцев В.Н. Закономерности формирования мерзлотно-геологических условий и особенности современного повторно-жильного льдообразования на территории приморских низменностей Якутии. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., Изд-во МГУ, 1976, 25 с.
5. Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, Наука, 1977, 215 с.
6. <https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>