

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

***Подсекция
лаборатории охраны геологической среды
и взаимосвязи поверхностных и подземных вод***

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

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2020

Содержание:

| | |
|--|----|
| 1. Преимущества и недостатки использования различных по структуре песчано-гелевых горизонтальных сорбирующих экранов В.И.Сергеев, Р.В. Сергеев, М.Л. Кулешова, Н.Ю. Степанова, Т.Г. Шимко | 2 |
| 2. Кинетика растворения гипсоангидритов в воде при 25° С. III. Обработка экспериментальных данных на основании традиционных модельных решений и с учетом одной общей концентрации раствора А. Л. Лебедев, И. В. Авилина | 7 |
| 3. Современный криогенный морфолитогенез на шельфе морей Восточной Арктики Е.И. Пижанкова, А.В. Гаврилов | 9 |
| 4. Палеогеографические события в формировании криолитозоны шельфа Восточной Арктики А.В.Гаврилов, В.В.Малахова, Е.И.Пижанкова, А.А.Попова | 14 |
| 5. Гидрогеологическое обоснование противооползневых мероприятий в бортах карьера М.В. Лехов | 18 |

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПО СТРУКТУРЕ ПЕСЧАНО-ГЕЛЕВЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОРБИРУЮЩИХ ЭКРАНОВ

В.И.Сергеев, Р.В. Сергеев, М.Л. Кулешова, Н.Ю. Степанова, Т.Г. Шимко

Исследования, проведенные в последние годы коллективом ЛОГС [1, 2, 3, 5] показали, что песчано-гелевый материал (ПГМ), получаемый путем пропитки песчаных грунтов щавелево-алюмосиликатным гелем, является перспективным геохимическим барьером. Он обладает значительной поглощающей способностью по отношению к целому ряду опасных загрязнителей (например, по Sr - 3,1; Cs - 1,9; U - 4,9; Pb - 4; Cd - 2 мг/см³). Согласно классификации токсичности инъекционных материалов, компоненты щавелево-алюмосиликатного (ЩАС) геля относятся к нетоксичным [4]. Важным достоинством таких экранов является возможность менять структурно-фильтрационные характеристики материала, варьируя технологию приготовления ПГМ.

Целью настоящей работы является оценка, на основании проведенных экспериментальных исследований, эффективности различных по структуре песчано-гелевых сорбирующих горизонтальных экранов и демонстрация возможных решений о целесообразности их использования на территориях, где развиты песчаные отложения. Через такие экраны на протяжении длительного времени должны ежедневно фильтроваться определенные объемы отходов с полной очисткой от загрязняющих компонентов. На выходе из экрана содержания элементов-загрязнителей не должны превышать ПДК.

В работе рассматриваются два варианта различных по структуре песчано-гелевых барьеров: 1) песчано-гелевый экран ненарушенной структуры и 2) песчано-гелевый экран нарушенной структуры.

Различная структура и, соответственно, проницаемость исследованных ПГМ расширяет возможность выбора оптимального варианта для конкретных объектов, связанных с очисткой жидких отходов от потенциальных загрязнителей подземных вод. Эти объекты могут отличаться доступностью свободных от застройки территорий и объемами ежедневного сброса отходов, требующих очистки. Не на всех планируемых объектах будет возможность приготовления на месте ЩАС раствора и различных вариантов ПГМ. В ряде случаев могут возникнуть проблемы с обустройством и эксплуатацией выделенных для очистки отходов участков, которые представляются наиболее экономически выгодными. Рассмотренные в работе преимущества и недостатки каждого из различных по структуре и свойствам искусственных горизонтальных сорбирующих экранов, позволят сделать более обоснованный выбор структуры геохимического барьера с учетом территориальных возможностей, а также

необходимого обустройства участка отходов при том, или ином варианте экрана.

Два рассматриваемых варианта песчано-гелевого сорбирующего экрана, прежде всего, отличаются технологией их создания. Наиболее простым в сооружении является экран ненарушенной структуры. Он может быть получен путем заливки песчаного грунта на отведенном участке щавелево-алюмосиликатным золем с заданным временем гелеобразования, которое определяется необходимой мощностью экрана, коэффициентом фильтрации (Кф) песка и вязкостью ЩАС раствора. Создание экрана нарушенной структуры осуществляется путем механического нарушения уже сформированного геля и последующего уплотнения материала экрана.

Одним из параметров оценки эффективности работы экранирующего материала является величина его поглощающей способности (N) в отношении потенциальных загрязнителей. С целью получения такой характеристики были проведены лабораторные исследования в динамическом режиме для исследуемых разновидностей ПГМ. В качестве потенциального загрязнителя был выбран кадмий, как один из наиболее токсичных элементов (ПДК - 0,001 мг/л), который может присутствовать в фильтрате свалок ТБО, жидких отходах металлургических и гальванических производств в количествах, значительно превышающих ПДК. По полученным в ходе экспериментов данным были построены «выходные кривые» для кадмия (Cd), приведенные на рис. 1.

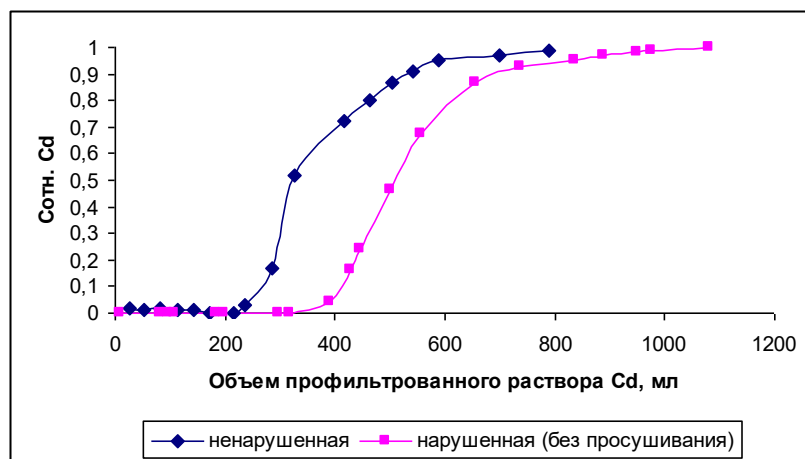


Рис. 1 «Выходные кривые» Cd для двух разновидностей песчано-гелевых экранов различной структуры

Условия проведения экспериментальных исследований и полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения экспериментов в динамическом режиме, величины поглощающей способности и фильтрационные свойства различных по структуре экранов

| Структура образца | Объем образца, см ³ | Концентрация Cd в растворе, мг/л | Скорость фильтрации в эксперименте V _ф , м/сут | Коэффициент фильтрации ПГМ K _ф , м/сут | Емкость поглощения N, мг/см ³ |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|---|--|
| Ненарушенная | 28,3 | 110 | 3x10 ⁻³ | 4x10 ⁻⁴ | 1,3 |
| Нарушенная | | 104 | 0,15 | 6,0 | 1,9 |

Из приведенных в табл. 1 данных по поглощающей способности следует, что оба исследованных варианта ПГМ могут использоваться в качестве геохимического барьера, причем экраны с нарушенной структурой более перспективны. Однако поглощающая способность не является единственным критерием при выборе материала для защитного барьера. Другой важной характеристикой экранирующего материала являются его фильтрационные свойства, которые также определялись в ходе лабораторных исследований (табл. 1).

При определении оптимального варианта экрана необходимо использовать максимально допустимую скорость фильтрации отходов через барьер. При малой проницаемости экрана это достигается повышением напора путем сооружения дамбы по периметру геохимического барьера. При большой проницаемости материала экрана может возникнуть необходимость снижения скорости фильтрации жидких отходов. При больших скоростях фильтрации в результате проявления кинетики сорбционного процесса (не мгновенного протекания процесса поглощения) возможно преждевременное появление на выходе из сорбента повышенной концентрации загрязнителя. Исследованиями ЛОГС было установлено, что скорость фильтрации, в основном, не должна превышать 3,0 м/сут. Снижение скорости фильтрации достигается путем регулирования градиента напора на экране. Для этого может потребоваться, например, создание замкнутой дренажной системы в основании защитного экрана с поднятым уровнем стока, что позволит получить требуемую скорость фильтрации.

Для обоснования эффективности применения предложенных в работе вариантов экранов были рассмотрены условия для оптимальной эксплуатации объекта с наиболее часто встречающимися параметрами техногенной нагрузки. Для примера взяты: объем необходимой ежесуточной очистки стоков на объекте – 100 м³, содержание Cd в отходах – 2 мг/л, время

использования сорбирующего экрана – 10 лет.

Обоснованность применения каждого из экранов должна учитывать экономическую выгоду при создании необходимых сооружений на объекте при обеспечении оптимальных условий его эксплуатации (дамбы, дренажные системы и т.п.). Используя результаты лабораторных исследований по оценке поглощающих и фильтрационных свойств ПГМ (табл. 1) и проведя расчеты на базе уравнения Дарси, была проведена оценка таких условий для каждого вида экранов. Площади и мощности геохимических барьеров различной структуры, обеспечивающих ежесуточную очистку отходов в объеме 100 м³ с концентрацией кадмия в 2,0 мг/л на протяжении 10 лет, представлены в табл.2.

Таблица 2

Условия, обеспечивающие эффективность использования геохимических барьеров различной структуры

| Экраны из ПГМ и мероприятия, сопровождающие их использование | | Площадь экрана, га | Мощность экрана, см | Расход ЩАС раствора, м ³ | Время эксплуатации, годы |
|--|--------------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Структура | Мероприятие | | | | |
| ненарушенная | исключаются | 12,5 | 0,45 | 220 | 10 |
| | дамба высотой 3,0 м | 0,83 | 6,7 | 220 | |
| нарушенная | дренажная система в основании экрана | 0,13 | 30,0 | 153 | |

Таким образом, на базе полученных результатов можно отметить преимущества и недостатки рассмотренных песчано-гелевых экранов с различной структурой.

При расчете параметров (площади и мощности) защитных экранов авторы руководствовались двумя положениями. Первое из них заключается в том, что площадь экрана должна обеспечить расход загрязненных отходов через сорбент. Второе - условие, исключающее выход кадмия за пределы экрана с концентрацией выше ПДК.

Прежде всего, необходимо констатировать тот факт, что наиболее простой способ создания экрана путем пропитки порового пространства песчаного грунта гелем ЩАС раствора в производственных условиях практически неприменим. Это следует из того, что площадь экрана, обеспечивающая очистку 100 м³/сут загрязненных жидких отходов, составляет 12,5 га. Маловероятно, что в производственных условиях под очистные сооружения будет выделена

такая площадь. Не менее важным недостатком является востребованная мощность экрана – 0,45 см. Создать экран такой мощности нереально, а ее увеличение приведет к серьезным дополнительным расходам.

В этой связи возникает необходимость использования мероприятий, связанных с повышением градиента фильтрации отходов через сорбент. Это требует сооружения дамбы по периметру экрана, что связано с дополнительными расходами.

Экраны нарушенной структуры имеют более высокую сорбционную способность, что следует рассматривать как преимущество. Кроме этого, достигаются более высокие скорости фильтрации, что позволяет сокращать площади и объемы защитных экранов. Вместе с тем, применение геохимических барьеров нарушенной структуры высокой проницаемости требует создания дренажной системы в основании экрана, которая позволяет уменьшать градиент фильтрации в теле сорбента. К недостаткам использования экранов нарушенной структуры следует также отнести и необходимость создания защитного пленочного экрана в основании дренажной системы.

Литература

1. Данченко Н. Н., Кулешова М.Л., Сергеев В.И. Изучение искусственных комбинированных материалов для проницаемых геохимических барьеров. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 2011. № 5. С. 54–60.
2. Кулешова М.Л., Данченко Н.Н. Экспериментальное исследование песчано-гелевого материала как геохимического барьера для кадмия. //Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. ГЕОХИ РАН Москва, 2019. с. 383-386
3. Полевич О.В., Удалов И.В., Чуенко А.В. Использование специальных геохимических барьеров для блокирования распространения тяжелых металлов и радионуклидов подземными техногенными потоками. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. - 2017. - № 2(108) - С. 194–200
4. Самарин Е.Н., Родькина И.А., Кравченко Н.С. Токсичность инъекционных материалов используемых при мелиорации грунтов. //Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 10. С 66-71.
5. В. И. Сергеев, Н. Н. Данченко, М. Л. Кулешова, Н.Ю. Степанова и др. Оценка эффективности песчано-гелевого материала как сорбционного экрана на пути миграции радионуклидов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. - 2009. - № 1. - С. 42–48.

КИНЕТИКА РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОАНГИДРИТОВ В ВОДЕ ПРИ 25° С. III.
ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВАНИИ
ТРАДИЦИОННЫХ МОДЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ И С УЧЕТОМ ОДНОЙ
ОБЩЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА

А. Л. Лебедев, И. В. Авилина

Процесс гидратации ангидрита обычно представляется в виде 3-5 последовательных стадий [1, 2]. На первых стадиях (этапах) происходит диффузия молекул воды в кристаллическую структуру ангидрита и образование в периферийных частях зерен адсорбированного слоя ионов Ca^{2+} и SO_4^{2-} , т.е. формируется пленочный раствор, насыщенный относительно гипса. Внутренний край этого слоя перемещается от поверхности частицы к ее центру. Заключительные стадии (наиболее медленные) – образование нуклеусов гипса с последующим образованием гипсового слоя на поверхности ангидрита.

Составить общую модель процесса гидратации ангидрита пока не представляется возможным, так как отсутствуют физико-химические характеристики, фактически, всех его стадий. В предыдущих исследованиях [3] при обработке экспериментальных данных использовалось суммарное уравнение кинетики (растворение гипса, ангидрита и осаждение гипса) с учетом решений уравнения Риккати. Площади поверхности растворения гипса и ангидрита задавались – *const*, а их значения величины растворимости подбирались так, чтобы теоретическое решение (кривая) соответствовало экспериментальным данным.

Цель данной работы – составление модели кинетики процесса растворения и гидратации ангидрита в воде на основе суммарного уравнения одновременного растворения гипса ангидрита (начальные стадии процесса гидратации).

Рассматривались два крайних случая: общая скорость процесса (dC/dt) контролируется скоростью гетерогенных поверхностных химических реакций ($dC = dC_1 + dC_2$, уравнения 1 и 2) или скоростью транспорта их реагентов и продуктов через гелеобразный слой гипса на поверхности ангидрита ($dC = dC_1 + dC_2$, уравнения 1 и 3):

$$V \frac{dC_1}{dt} = k_1 \xi_1 S_1 (C_{m_1} - C_1), \quad - \text{ скорость растворения гипса} \quad (1)$$

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

$$V \frac{dC_2}{dt} = \frac{D}{h} S_2 (C_{m_2} - C_2), \quad - \text{ скорость выщелачивания ангидрита} \quad (3)$$

где k – константа скорости реакции растворения гипса и ангидрита; C_m, C – концентрация ионов Ca^{2+} соответственно равновесия и на момент времени t ; V – объем раствора; S – площадь

поверхности растворения; D – коэффициент диффузии ионов Ca^{2+} через слой геля толщиной h . Индексы 1 и 2 характеризуют величины C , C_m , k , ξ и S , при растворении гипса и ангидрита соответственно. Значения $C_{m1,2}$ рассчитывались по диаграмме равновесия гипса и ангидрита в воде при 25°C ($C_{m2} = \text{const}$, $C_{m1} = C_{m1}(C_2)$). Значения $S_{1,2}$ подбирались так, чтобы теоретическое решение соответствовало экспериментальным данным ($S_1 = S_1(C)$, $S_2 = S_2(C)$).

Предполагался выбор модели кинетики растворения ангидрита (уравнения 1 и 2 или 1 и 3), при анализе результатов обработки экспериментальных данных, с учетом полученных значений величин k_2 и D , при их сопоставлении с известными значениями из литературных источников.

Методика [4]. Использовались опытные данные, в виде зависимостей $C(t)$, полученные в результате экспериментальных исследований кинетики растворения гипсоангидритов в воде при 25°C и P 0.1 МПа. Кинетические кривые были получены в условиях кинетического режима растворения плоской шероховатой поверхности в ячейке со статическим режимом работы. Решались прямые и обратные задачи. Прямая задача — определение значений концентрации при заданных значениях параметров C_{m1} , C_{m2} , S_1 , S_2 , обратная — определение параметров, соответствующих минимуму функции качества [5].

По результатам обработки экспериментальных данных в виде зависимостей $C(t)$ в предпосылке контроля общей скорости процесса скоростью гетерогенных поверхностных химических реакций (уравнения 1 и 2) установленное значение величины $k_2 = 0.005 \text{ см}^4/(\text{ммоль}\cdot\text{с})$ оказалось сходным со значениями литературных источников.

Литература

1. Печеркин А.И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Иркут. гос.ун-т, 1986, 172 с.
2. Sievert T., Wolter A., Singh N.B. Hydration of anhydrite of gypsum ($\text{CaSO}_4\cdot\text{II}$) in a ball mill // Cement and Concrete Res. 2005. Vol. 35. P. 623–630.
3. Лебедев А. Л., Авилина И. В. Экспериментальные исследования кинетики растворения гипсоангидритов в воде // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология 2019, 3, 93-96.
4. Лебедев А.Л. Кинетика растворения гипса в воде // Геохимия. 2015, 9, 828–841.
5. Шестаков В.М., Невечера И.К., Авилина И.В. Моделирование контаминации патогенных микроорганизмов в подземных водах. М.: Академкнига, 2007. 95 с

СОВРЕМЕННЫЙ КРИОГЕННЫЙ МОРФОЛИТОГЕНЕЗ НА ШЕЛЬФЕ МОРЕЙ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

Е.И. Пижанкова, А.В. Гаврилов

Введение. Шельф морей Лаптевых и запада Восточно-Сибирского характеризуется наличием банок. Они являются останцами субэвральской равнины, слагавшейся синкриогенными отложениями ледового комплекса (ЛК) позднего неоплейстоцена, пронизанными мощными повторно-жильными льдами.

В сентябре 2013 г. с борта вертолета было выявлено, что в море Лаптевых вершина одной из банок на месте бывших островов, слагавшихся ЛК (Васильевской банки на Семеновском мелководье к западу от острова Столбовой) осушена. Образование острова на Васильевской банке было подтверждено гидрографической экспедицией в сентябре 2014 г. Его площадь в то время составляла около 0,038 км², высота над уровнем моря менее 1 м. Остров был назван Яя [[https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_\(остров\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_(остров))].

Материалы и методы. Основными материалами для исследования являлись космические снимки (КС) Landsat, Sentinel и Terra/MODIS за 1973-2020 гг., а также геологических материалы: Государственные геологические карты масштаба 1:1 000 000 второго и третьего поколений, тектонические и неотектонические карты, опубликованные данные сейсмоакустического профилирования Семеновского мелководья и мониторинга Тихоокеанского океанологического института (ТОИ ДВО) РАН. Использовались также топографические карты масштаба 1: 200000 и исторические сведения. Синтез и совмещение разновременных дистанционных данных, выявление новообразований и взвесей в морской воде осуществлялось с помощью программного пакета ScanEx Image Processor. Измерения для изучения динамики берегов, а также дешифрирование прибрежных ландшафтов проводились в ГИС-среде MapInfo Professional.

Район исследований. В геологическом отношении район исследований относится к эпикиммерийской платформе, занимающей шельф морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. На шельфе существуют многолетнемерзлые породы (ММП) преимущественно сплошного распространения, образовавшиеся при его осушении в позднем и среднем неоплейстоцене. Ныне они деградируют под действием теплового потока из недр. Деградация сверху имеет место сейчас в связи с повышением среднегодовой температуры придонной воды, особенно значительной в прибрежной зоне, и засолением донных пород, понижающих температуру их замерзания - оттаивания.

Данные по изменению глубины моря в пределах Семеновской банки. Семеновская банка расположена в пределах одноименного мелководья, где существует еще Васильевская банка. Они образовались на месте размытых в 1951 и 1936 гг. одноименных островов [1 Гаккель, 1957]. В 1955 г. минимальная глубина моря в пределах Семеновской банки составляла 0.1 м [2 Клюев и др., 1981; 3 Арэ, 2012]. В 1965 г. вершинная поверхность Семеновского мелководья оконтуривалась изобатой 2 м. Тепловые просадки и размыв Семеновской банки в соответствии с навигационными картами 1969-1971 гг. привели к ее углублению на 2-5 м [3 Арэ, 2012]. Мониторинг глубин Семеновской банки (промеры с бортов низкосидящих судов в 1999, 2000, 2003-2006 гг.), дал возможность охарактеризовать динамику ее вершинной поверхности в последующие годы [4 Чаркин и др., 2007]. Наименьшая глубина Семеновской банки в начале 2000 гг. по этим данным составляла 4.2 м на фоне глубин от 5.5 до 8.6 м в пределах мелководья. В более поздних публикациях [5 Дударев, 2016] приводятся существенно меньшие минимальные глубины Семеновской банки: 0.8-1.0 м.

Данные по морфодинамике мелководий, полученные с помощью космоснимков. По данным снимков Terra/MODIS мель на вершине Васильевской банки впервые наблюдалась по обрушению волн (бурунам) уже в 2003-2005 гг. С конца октября 2003 г. на этой банке практически ежегодно формируется стамуха. Сопоставление снимков Landsat-7 и -8 за 2007, 2018, 2020 гг. позволило зафиксировать возникновение острова Яя и нарастание его площади.

Использование разносезонных КС Landsat, Sentinel и MODIS за 1973-2019 гг. дало возможность выявить ряд других банок. Они дешифрируются по приуроченности к ним стамух в периоды ледостава и разрушения сезонного льда, а в безледный сезон - по наличию полей взвеси над банками или бурунов при ветре. Таковы банки на Семеновском мелководье, на мелководье Нерпа, безымянные мелководья к северо-востоку и западу от дельты р. Лена, банка Опасная [6 Кучейко и др., 2020]. Повышение поверхности Семеновской банки на одноименном мелководье впервые зафиксировано на КС в 2004 г. по бурунам над нею. Позднее (2018 г.) ее местоположение на КС определялось также по бурунам на изображении. При ветровых сгонах банки могут обнажаться. О. Затопляемый на банке Вест (в 117 км к востоку от дельты р. Лена) и остров Лейкина (Осушной), в 80 км к северо-востоку от п-ова Терпий-Тумса, относятся к образованиям, обнажающимся при сгонах и затопляемым при нагонах. По КС изменение очертаний и площади зафиксированы у островов Песчаный, Лейкина, Наносный, Самолета, Аэросъемки, Яя.

Существование сгонно-нагонных явлений затрудняет точное определение конфигурации и параметров низменных островов. Тем не менее, для о. Наносный, расположенного на мелководье к северу от о. Котельный, установлено нарастание площади и длины, особенно

выраженное в последние годы. Зафиксировано также смещение береговой линии острова в восточном направлении. Оно происходит в связи с доминированием в безледный сезон западных ветров и течений.

Вековые изменения природной обстановки. Реконструкция среднегодовой температуры воздуха [7 Клименко и др., 2013] показывает, что в XVII-начале XX вв., когда острова-останцы ЛК и банки на их месте размывались, среднегодовая температура воздуха была на 1,5-2,0°C ниже современной. Об изменении ледовитости морей могут свидетельствовать исторические данные о возможности мореплаваний в арктических морях. Например, изучение Новосибирских островов в 1770-1824 гг. происходило исключительно путем передвижения по льду. Вокруг Семеновского мелководья в это время в течение всего лета мог сохраняться морской припай или существовать дрейфующие льды [8 Жигарев, Совершаев, 1984]. Освобождение ото льдов происходило только в отдельные годы.

Активизация криогенных и гидродинамических процессов, инициированная современным потеплением климата. Активизация криогенных процессов обеспечивается возрастающей мощностью гидродинамических процессов в связи с сокращением ледовитости и увеличением продолжительности динамически активного сезона. Современное потепление климата, ведущее отсчет от начала XX века, наиболее полное проявление получило в 1990-2000-е гг. Потепление в высоких широтах (60-85°с.ш.) более чем в два раза превышает таковое для Северного полушария в целом. Еще значительно оно в пределах акваторий арктических морей. Причиной такого повышения является сокращение площади морских льдов, неуклонно уменьшающее альбедо поверхности. Оно сопровождается ростом продолжительности безледного сезона. Площадь морских льдов в 2005-2014 гг. сократилась в 5 раз по сравнению с 1960-80 гг., а продолжительности безледного сезона в 2001-2011 гг. возросла до 40 суток относительно холодных 1965—1975 гг. Суммарно это увеличило динамически активный период с 10-20% годового времени в 1970-е гг. [9] до 20-30% в 2001-2011 гг. Результатом явилось увеличение длины разгона волн, в целом - волновой активности и потенциала морфолитогенеза.

В результате воздействия криогенных процессов на дно морей Лаптевых и Восточно-Сибирского ежегодно поступает 62 и 90 млн. т осадков соответственно [10]. Столь значительные массы осадочного вещества образуются за счет активизации следующих процессов. Это - 2-3-х кратное возрастание скорости отступления берегов под действием термоабразии и термоденудации, активизация тепловых просадок дна и донной термоабразии, ускорение деградации мерзлой толщи со стороны их кровли в связи с повышением температуры придонной воды.

Роль современных вертикальных движений земной коры в осадконакоплении на мелководьях. Осадконакопление происходит на фоне повышения уровня моря, оцениваемого в 3.2 мм/год. Оценка темпа современных вертикальных тектонических движений, проведенная по данным уровнемерных станций и сейсмоактивности шельфа, показали, что темп современных положительных движений на участках о-ов Наносный и Яя характеризуется значениями не ниже 2-3 мм/год, что соответствует данным о повышении уровня моря.

Ледовые процессы. Наиболее важной из них является аккумуляция в результате транспортной деятельности внутриводного и мутного льда, т.е. содержащего большое количество минеральных и органических включений. Существенную роль играет бульдозерное перемещение льдов и донных осадков вверх по подводному склону дрейфующими льдами под напором прижимных ветров. В холодные годы, по-видимому, имеет место также погребение поверхностных льдов (остатков припая, стамух, айсбергов) морскими осадками. Мелководья являются местом сосредоточения стамух, часто смерзающихся с дном. Они защищают новообразованные формы рельефа от волнения, принимая на себя штормовые волнения и ледовые нагрузки со стороны моря. На застамушенных участках после стаивания стамух осадки могут быть опреснены, что облегчает их промерзание и способствует осадконакоплению.

Выводы

1. На шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, в XVII-XX вв. острова-останцы ЛК позднего неоплейстоцена, а позже - мелководья и банки, сформировавшиеся на их месте, размывались. На рубеже XX и XXI веков на этих мелководьях начинается осадконакопление с новообразованием островов.

2. Смена направленности морфолитогенеза происходит вследствие сокращения ледовитости и увеличения продолжительности безледного сезона.

3. Приоритетная роль в осадконакоплении на мелководьях ныне принадлежит гидрогенным процессам, тогда как ранее оно осуществлялось в основном морскими льдами.

4. Дефицит осадочного вещества в XVII-XIX вв. на рубеже XX и XXI вв. сменяется их избытком в связи с активизацией криогенных процессов. В результате термоабразионный профиль подводного берегового склона на мелководьях преобразуется в аккумулятивный.

5. Мелководья приурочены к положительным морфоструктурам, отвечающим поднятиям и горстам в рифтовой системе моря Лаптевых. Осадконакопление на мелководьях идет в условиях повышения уровня моря, происходящего со скоростью 3 мм/год. Оно становится заметным и отражается на космических снимках для морфоструктур, испытывающих тектоническое поднятие, темп которого соизмерим со скоростью повышения уровня моря. Это

район о. Наносный и Семеновское мелководье, приуроченное к сейсмически активной зоне моря Лаптевых.

6. 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.

Литература

1. Гаккель Я.Я. Наука и освоение Арктики. Л., Морской транспорт, 1957, 132 с.
2. Клюев Е.В., Котюх А.А., Оленина Н.В. Картографо-гидрографическая интерпретация исчезновения в море Лаптевых островов Семеновского и Васильевского. Известия Всесоюз. геогр. об-ва. 1981. Вып. 6. С. 485–492.
3. Арэ Ф.Э. Разрушение берегов арктических приморских низменностей. Новосибирск, Академическое изд-во Гео, 2012, 291 с.
4. Чаркин А.Н., Дударев О.В., Семилетов И.П., Шило И.Н. Современное состояние реликтовых банок на шельфе морей Восточно-Сибирского региона // Криогенные ресурсы полярных регионов. Материалы междунар. конф., Салехард, июнь 2007, т. 1. Пущино, ОНТИ Пущинского научного центра РАН, с.184-186.
5. Дударев О.В. Современный литоморфогенез на Восточно-Арктическом шельфе. Автореф....д. г.-м. н., Владивосток, 2016, 49 с.
6. Кучейко А.А., Иванов А.Ю., Айнов К.В., Лисаченко Е.С. Обнаружение отмелей и малых островов в южной части моря Лаптевых по спутниковым данным // Земля из космоса. Вып. № 27. 2020. С. 50–60.
7. Клименко В.В., Мацковский В.В., Дальманн Д. Комплексная реконструкция температуры российской Арктики за последние два тысячелетия // Арктика: экология и экономика № 4 (12), 2013. С. 84-95.
8. Жигарев Л.А., Совершаев В.А. Термоабразионное разрушение арктических островов // Береговые процессы в криолитозоне, Новосибирск, Наука, 1984, с. 31-38.
9. Совершаев В.А. Влияние морских льдов на развитие криолитозоны арктического шельфа (на примере восточных арктических море) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, Изд. ИМ СО АН СССР, 1981, с. 70-83.
10. Григорьев М.Н. Исследование деградации многолетнемерзлых пород морей Восточной Сибири (по результатам экспедиций 2014–2016 гг.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Вып.1. С. 89–96.
11. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_\(остров\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_(остров))

ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ В ФОРМИРОВАНИИ КРИОЛИТОЗОНЫ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

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

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
геологический факультет,*

²*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,*

³*ООО «Северные Изыскания»*

Введение. Сведения о развитии субмаринной криолитозоны необходимы для поисков и разведки углеводородного сырья на шельфе, безопасного функционирования Северного морского пути. К настоящему времени опубликован целый ряд моделей криолитозоны Восточно-Сибирского сектора арктических морей. Все они построены, исходя из представлений об отсутствии среднеплейстоценового оледенения на шельфе, хотя ледниковый генезис пластовых льдов на о-вах Новая Сибирь и Фаддеевский был установлен 10-15 лет назад [1, 3].

Нами исследовалось формирование многолетнемерзлых пород (ММП) и зоны стабильности гидратов газов (ЗСГГ) в связи с эволюцией криосферы региона в последние 200 тыс. лет. Исследования выполнялись с помощью теплового математического моделирования. Они предусматривали использование реальных разрезов области оледенения и сопоставление результатов оценки с параметрами ММП и ЗСГГ в неледниковых условиях.

Методы исследований и построение сценария развития криосферы региона в последние 200 тыс. лет. Для расчета теплового состояния многолетнемерзлых пород и термобарических условий для газогидратов использовалась одномерная модель теплофизических процессов в донных отложениях с учетом фазовых переходов между мерзлым и талым грунтом [5].

Сценарий уровня моря для внеледниковых условий строился на основе гляциоэвстатических кривых колебаний уровня Мирового океана и их трансформации с помощью данных по динамике седиментационных обстановок в регионе. Материалами для построения палеотемпературного сценария в период 200-15 тыс.л.н. являлись данные палеотемпературных реконструкций по датированным осадкам севера Якутии и Новосибирским островам - с одной стороны, и изотопная палеотемпературная кривая ст. Восток (Восточная Антарктида) – с другой. С помощью первых изотопная антарктическая кривая трансформировалась в региональную палеотемпературную кривую [2]. Для периода 15-0 тыс.л.н. основными материалами для построения сценария динамики уровня моря и температуры пород являлись модель хода фландрской трансгрессии [4] и ее модификация [2].

Основные новации были сопряжены с оценкой высотного положения ложа ледника и его мощности. Она была необходима для построения кривых динамики уровня моря и температуры пород. Указанные кривые были построены на основе данных о развитии оледенения в морских условиях, приуроченности пластового льда к наиболее глубоководным фациям канарчакской свиты среднего неоплейстоцена, датирования млекопитающих мамонтового комплекса и абс. высот морской позднеоплейстоценовой террасы на островах Новая Сибирь и Фаддеевский [1].

Тестирование сценария производилось путем математического моделирования на участках бурения на о. Новая Сибирь, обеспеченных геотермическими наблюдениями в скважинах.

Субмаринные ММП (результаты моделирования). Результаты моделирования в неледниковых и ледниковых условиях в соответствии со сценарием при тепловом потоке 50, 60 и 75 Вт/м² показывают зависимость мощности (глубины залегания нижней границы) ММП от геотермического потока, истории геологического развития (ледниковые, неледниковые условия) и глубины моря.

Зависимость мощности ММП от плотности геотермического потока выражена наиболее ярко. Она сокращается с ростом плотности как в ледниковых, так и внеледниковых условиях. Сокращение на разных изобатах укладывается в диапазон 320-280 м. Зависимость мощности ММП от наличия или отсутствия оледенения выражается также весьма отчетливо. В ледниковых условиях по сравнению с внеледниковыми при 50 мВт/м² она меньше примерно на 200 м на всех изобатах. При 75 мВт/м² сокращение выражается в таких величинах: 150 м на изобате 5 м и более 200 м на изобатах 20 и 40 м, что приводит к формированию прерывистого или островного распространения ММП. В зависимости от соотношения температуры придонной воды и температуры замерзания-таяния поровых растворов пород на этих изобатах возможно новообразование современных ММП.

Эволюция толщ ММП. Результаты моделирования показывают, что наиболее значительное влияние оледенение оказало на эволюцию толщ ММП и ЗСГГ. По нашим данным ММП и ЗСГГ в неледниковых условиях непрерывно существовали в течение всего расчетного периода (200 т.л.н.- современность). В ледниковой области в течение последних 200 тыс. лет ММП существовали примерно с 190 по 125 т.л.н. и с 70-55 т.л.н. до настоящего времени.

Зона стабильности гидратов газов, как показывают результаты моделирования, формировалась совместно с ММП в неледниковых условиях при тепловом потоке от 50 до 75 мВт/м², в ледниковых – дошла до современности только при 50 и 60 мВт/м². Кровля ЗСГГ по результатам моделирования в ледниковых условиях залегает на глубинах 140-160 м, в неледниковых – несколько ниже. Меньшие значения отвечают изобатам 40, бóльшие – изобате

5 м. Нижняя граница ЗСГГ в ледниковых условиях располагается на глубинах, близких 700 м при 50 мВт/м², 450-500 - при 60 мВт/м². В неледниковых условиях глубины ее залегания составляют 900-1050 и 770-790 м при 50 и 60 мВт/м² соответственно. При 75 мВт/м² они в основном близки к 400 м.

Выводы

1. Впервые с помощью математического моделирования изучено распространение, мощность и глубина залегания кровли толщ ММП области покровного оледенения конца среднего неоплейстоцена на северо-западе Восточно-Сибирского шельфа.

2. Моделирование впервые базировалось не на условных схематизированных разрезах, а на данных бурения толщ, вмещающих, перекрывающих и подстилающих пластовый лед острова Новая Сибирь. Палеотемпературный сценарий тестирован результатами геотермических наблюдений в скважинах. Этим обеспечивается реалистичность результатов моделирования.

3. Результаты моделирования показывают, что в ледниковой области мощность ММП при тепловом потоке 50 и 60 мВт/м² на 150-200 м меньше, чем в неледниковых. При тепловом потоке 75 мВт/м² на изобатах 20-40 м оно приводит к формированию прерывистого или островного распространения ММП. В зависимости от соотношения температуры придонной воды и температуры замерзания-таяния поровых растворов пород на этих изобатах может происходить новообразование современных ММП.

4. ЗСГГ в неледниковых условиях формировалась при тепловом потоке от 50 до 75 мВт/м², в ледниковых, в связи с малой мощностью ММП при 75 мВт/м², - только при 50 и 60 мВт/м².

5. Толщи ММП в неледниковых условиях непрерывно существуют в течение всего расчетного периода (200 т.л.н. – современность). В ледниковой области на протяжении среднего плейстоцена-голоцена они возникали и деградировали. Современные толщи ММП существуют с МИС-4 (60-70 тыс. лет).

Литература

1. Базилян А.Э., Никольский П.А. Опорный разрез четвертичных отложений мыса Каменный (Новая Сибирь) // Бюл. Комис. по изучению четвертичного периода, 2007, № 67, с. 76-84.
2. Гаврилов А.В. Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене – голоцене). Автореф.... д.г.-м.н. М., 2008, 48 с.

3. Тумской В.Е. Особенности криолитогенеза отложений северной Якутии в среднем неоплейстоцене – голоцене// Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 1, с. 12–21.
4. Bauch H.A., Muller-Lupp T, Taldenkova E. et al. Chronology of the Holocene transgression at the Northern Siberia margin // *Global and Planetary Change*, 31, 2001 ELSEVIER, p. 125-139.
5. Malakhova, V.V.; Eliseev, A.V. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments. *Global and Planetary Change* **2020**, 192, 103249. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103249

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В БОРТАХ КАРЬЕРА

М.В. Лехов

Для разработки карьера, расположенного в устье межгорной впадины (рис. 1), на выходе сжатого склонами потока подземных вод в долину, его разгрузка представляет опасность как силовой фактор нарушения устойчивости бортов. Гидродинамическая сила прямо пропорциональна градиентам напора фильтрационного потока, и в условиях выклинивания и разгрузки на склоне может достигать величин, соизмеримых с силой бокового давления грунта или тангенциальной составляющей силы веса массива на оползневой поверхности, значительно увеличивая и ту, и другую.

При прочих равных условиях устранение гидродинамической силы может увеличивать запас устойчивости склонов до придания ему стабильного состояния. Достигнуть этого можно перехватом потока в головной части. Между тем практика показывает, что решение задачи противооползневой защиты должно иметь запас надежности и ориентироваться на комплекс мероприятий.

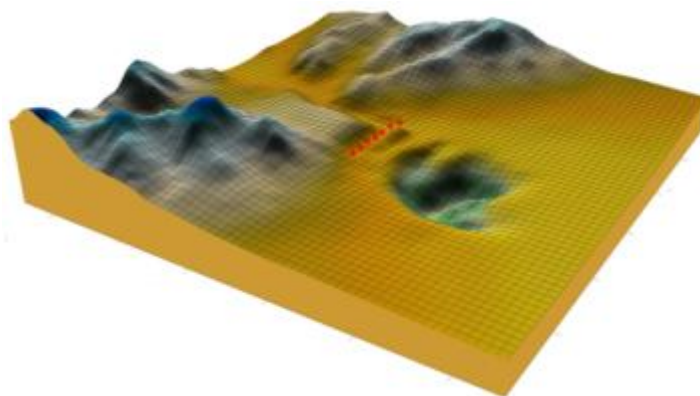


Рис. 1. Расположение карьера в устье межгорной впадины с сосредоточенным подземным стоком. Схема размещения ряда скважин для дренажного перехвата фильтрационного потока.

Борт карьера в его верхней части, как показали расчеты (рис. 2), находится в состоянии предельного, условного равновесия. Главными факторами дестабилизации являются фильтрационная сила потока грунтовых вод в верхнем горизонте четвертичных отложений, разгружающегося на склон, и геометрия профиля откосов. Оба фактора являются равноценными. Линейная разгрузка грунтовых вод на склоне, открытая и скрытая осыпными накоплениями, свидетельствует о значительной роли глинистой толщи, подстилающей верхний горизонт (рис. 3).

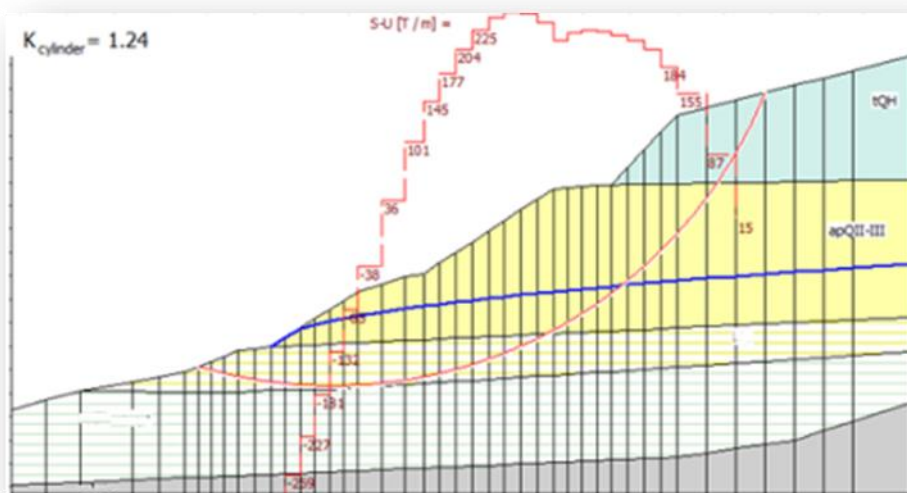


Рис. 2. Расчет устойчивости борта карьера. Программа SLUMP (автор М. Лехов)

Подход к инженерному решению по обеспечению устойчивости должен носить снижать влияние и того и другого фактора. На основе выполненных гидрогеомеханических расчетов представляется эффективным устройство ряда дренажных скважин, перехватывающих поток грунтовых вод на подходе к карьеру (рис. 1), и планировка верхней части его борта.

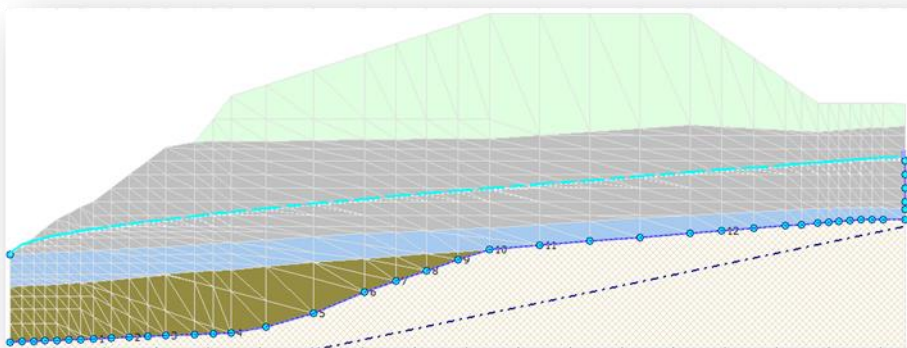


Рис. 3. Профильная модель разгрузки фильтрационного потока в борту карьера.

Программа PERFIL (автор М. Лехов)

Суммарный результат двух видов мероприятий выражается в повышении коэффициента запаса устойчивости до приемлемых значений. В этом случае состояние может оцениваться как устойчивое.

Характеристики дренажа должны быть обоснованы данными изысканий, которые позволят оптимизировать размещение (рис. 1), длину ряда, глубину, диаметр скважин и шаг

между ними. Работа дренажа принудительная, путем откачки насосами, опущенными в нижнюю часть фильтра и отстойник. Водоотведение – в систему общего водоотлива из карьера, что не увеличивает его суммарный дебит. (Решение со свободным перепуском грунтовых вод в нижний водоносный горизонт по дренажным скважинам имеет недостатки – требуются длинные фильтры большого диаметра двух ярусов в одном стволе, фильтры подвержены кольматации.) Суммарный дебит, по оценкам, не влечет за собой опасные изменения гидролого-гидрогеологических условий, так как дренажный перехват на предгорном склоне имеет небольшую зону влияния. Оценки основаны на нецелевых изысканиях и нуждаются в уточнении.

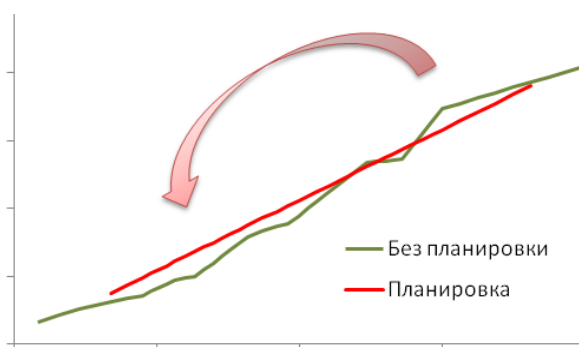


Рис. 4. Профиль борта в современном состоянии и предполагаемый спланированный единый откос. Стрелка - схема перемещения грунта.

Не менее важной мерой обеспечения безопасных условий горных работ является планировка борта, которая может осуществляться перемещением грунта, снимаемого с бровки карьера вниз в соответствии со схемой на рис. 4. Срезка прибровочного уступа снимает избыточный вес в верхней, головной части потенциального оползневого тела и создает пригруз в нижней. В целом, схема обеспечивает уменьшение поворотного момента сил. Объем перемещаемого грунта, исходя из имитаций, не столь значительный, если сравнивать с объемами разработки месторождения.

Оценки, которые являются результатом предварительного анализа, носят в значительной степени экспертный характер. Обоснованные рекомендации, касающиеся контроля воздействия подземных вод, нуждаются в дополнительном и специальном изучении гидрогеологических условий. Инженерное решение требует оптимизационного подхода с использованием модельных имитаций, выполнить которые можно при наличии обоснованной информационной базы.