

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, научный сотрудник Дроздова О.Ю.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2025

Содержание:

1. К вопросу схематизации состава гипса и ангидрита (в виде одноименного иона Ca^{2+}) в моделях кинетики растворения гипсоангидритов в воде при 25°C	
А.Л. Лебедев, И. В. Авилина	2
2. К вопросу определения коэффициента диффузии ионов Ca^{2+} при выщелачивании гипса из порового пространства песчаников	
Д.А. Павлов, А.Л. Лебедев	4
3. О проблемах хранения солевых шламов при добыче калийной соли	
Т.Г. Шимко, В.Л. Воронин, М.Л. Кулешова, А.П. Пензев, М.А. Царёв	7
4. Фильтрационная консолидация сильнодеформируемых грунтов	
М. В. Лехов	14
5. Особенности формирования полигонально-жильных структур береговой зоны арктических морей (по спутниковым данным)	
А.В. Гаврилов, Е.И. Пижанкова	19
6. Состояние пород (мерзлое, талое) поднятия Де Лонга (северо-западная часть Восточно-Сибирского шельфа) по результатам математического моделирования	
А.В. Гаврилов, В.В. Малахова, Е.И. Пижанкова	26
7. Влияние сжигания попутного нефтяного газа на природную среду Среднего Приобья	
Е.И. Пижанкова, И.Н. Пижанков	31
8. Морозобойное растрескивание грунтов на Севере Якутии по данным натурных наблюдений	
А. Ю. Деревягин	40

К ВОПРОСУ СХЕМАТИЗАЦИИ СОСТАВА ГИПСА И АНГИДРИТА (В ВИДЕ ОДНОИМЕННОГО ИОНА Ca^{2+}) В МОДЕЛЯХ КИНЕТИКИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОАНГИДРИТОВ В ВОДЕ ПРИ 25°C

А. Л. Лебедев, И. В. Авилина

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований кинетики растворения гипсоангидритов в воде при 25 °С. Процесс растворения гипсоангидритов рассматривался с учетом нескольких механизмов: растворение гипса и ангидрита, осаждение гипса из пересыщенного раствора и/или диффузия молекул воды в кристаллическую решетку ангидрита [1, 2].

Цель данной работы – составление модели кинетики растворения гипсоангидритов в воде для начальных стадий этого процесса, т.е. без учета реакции осаждения гипса и определение параметров кинетики растворения ангидрита в воде, как наименее изученного.

Исследования проводились в условиях кинетического режима растворения плоской шероховатой поверхности в ячейке со статическим режимом работы. В крышку термостатированной ячейки были вмонтированы электроды, с помощью которых методом кондуктометрии определялось удельное электрическое сопротивление раствора. Содержание гипса и ангидрита в образцах соответственно 7 и 90 мас.%. По окончании опытов были получены кинетические кривые в виде зависимостей ионов Ca^{2+} от времени t . Более подробно экспериментальная установка и методика проведения опытов приводятся в работе [3].

При выборе расчетной схемы (т.е. модели) схематизация состава гипса и ангидрита рассматривалась в виде перехода в раствор одноименного иона Ca^{2+} ($C_{1,2}$ или C). Для построения кинетических зависимостей были составлены 4 предполагаемые модели по взаимодействию реакционной поверхности гипсоангидритов с водой.

Модель 1

$$R_1 = \frac{V}{S_1} \frac{dC_1}{dt} = k_1(C_{m1} - C) \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{V}{S_2} \frac{dC_2}{dt} = k_2(C_{m2} - C)^2, \quad (2)$$

где $C = C_1 + C_2$, $S_1 = 0.67 \text{ см}^2$, $S_2 = 8.65 \text{ см}^2$, $V = 88 \text{ мл}$, $S = 9.62 \text{ см}^2$, $k_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ см/с}$.

Модель 2

$$\frac{SR}{V} = \frac{dC}{dt} = \frac{k_1 S_1}{V} (C_{m1} - C) + \frac{k_2 S_2}{V} (C_{m2} - C)^2 \quad (3)$$

Более подробно модель 2 представлена в работе [3] (Обозначения см. модель 1).

Модель 3

$$R_1 = \frac{V}{S} \frac{dC_1}{dt} = k_1(C_{m1} - C_1) \frac{S_1}{S} \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{V}{S} \frac{dC_2}{dt} = k_2(C_{m2} - C_2)^2 \frac{S_2}{S}, \quad (5)$$

где $C = C_1 \frac{S_1}{S} + C_2 \frac{S_2}{S}$, $S = S_1 + S_2$, остальные обозначения см. модель 1.

Модель 4

$$R_1 = \frac{V}{S_1} \frac{dC_1}{dt} = k_1(C_{m1} - C_1) \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{V}{S_2} \frac{dC_2}{dt} = k_2(C_{m2} - C_2)^2 \quad (7)$$

Более подробно модель 4 представлена в работе [4] (Обозначения см. модель 1).

Обработка опытных данных в виде зависимостей $C(t)$ показала, что наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных значений наблюдается при схематизации составов гипса и ангидрита в виде отдельных переменных (C_1 и C_2), а степень насыщенности раствора – с учетом их растворимостей (C_{m1} , C_{m2}) и суммарной концентрации C .

Таким образом, модельному представлению кинетики растворения гипсоангидритов в воде (ненасыщенной в отношении гипса, 25°C) соответствует система уравнений (1) - (2), а $k_2 = 9.7 \times 10^{-4} \text{ см}^4/(\text{ммоль с})$.

Литература

1. К. А. Горбунова. Карст гипса СССР. Учебное пособие по спецкурсу. Изд. Пермского ун-та. 1977, 84 с.
2. Klimchouk A. The dissolution and conversions of gypsum and anhydrite // Int. J. Speleol. 1996. N 25(3-4), P. 21-36.
3. Лебедев А. Л., Авилина И. В. Экспериментальные исследования кинетики растворения гипсоангидритов в воде // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2019. № 3. С. 93-96.
4. Лебедев А.Л., Авилина И.В. Исследования кинетики реакций растворения гипсоангидритов в воде на начальных стадиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 179-181.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ИОНОВ Ca^{2+} ПРИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ГИПСА ИЗ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПЕСЧАНИКОВ

Д. А. Павлов, А. Л. Лебедев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В районах распространения гипса изменения природных условий, связанных с техногенным воздействием на геологическую среду, часто приводят к интенсификации процесса массообмена и, вследствие чего – к увеличению проницаемости и пористости пород в результате его растворения. Прогнозные оценки процесса массообмена в массивах загипсованных трещиновато–пористых пород с подземными водами рассматриваются с учетом физико-химических процессов обмена и экспериментальными методами определения их моделей и параметров. В трещиноватых загипсованных породах гипс заполняет трещинное пространство между блоков в виде прослоев и (или) поровый объем блоков. Фильтрация осуществляется, главным образом, в трещинах, сформированных по контактам прослоев со стенками блоков, а при их дальнейшем растворении и вымыве (или при их отсутствии) – в трещинном пространстве между блоков.

Основные положения схематизации процессов растворения и выщелачивания гипса: *в трещине и в пористом блоке породы* основываются на физико-химических характеристиках растворения поверхности прослоя и выщелачивания гипса из порового объема блока; *в расчетных блоках модели* – на соизмеримости массовых потоков растворенного гипса в блоках пород и в трещинах, скорости выноса массы из блоков в трещины относительно скорости растворения стенок прослоя и на оценке величины длины пути насыщения раствора гипсом (т.е. “временные” шаги и размеры блоков сеточной модели выбираются так, чтобы процессы растворения гипса в них (блоках), можно было представить как “равновесные”).

Скорость выщелачивания гипса из порового объема блока пород вычисляется по формуле [1]:

$$R = V^2 dC/dt = D\rho n S^2 (C_m - C)/(C - C_0), \quad (1)$$

где R – скорость выщелачивания; D – коэффициент диффузии реагентов и продуктов реакции растворения гипса в поровом пространстве блока; V – объем раствора, S – площадь поверхности выщелачивания, C_m , C – концентрация продуктов реакции растворения гипса в растворе, насыщения и на момент времени t соответственно ($C = C_0$ при $t = 0$); ρ – плотность гипса; n – пористость породы (без гипса), в которой гипс первоначально заполняет все поры, т.е. его плотность в породе – ρn .

Результат интегрирования уравнения (1) прямой линией в координатах $F_1 - t$ имеет вид [1]:

$$F_1 = (C_m - C_0) \ln((C_m - C_0)/(C_m - C)) - (C - C_0) = D\rho n (S/V)^2 t, \quad (2)$$

а при $C_0 = 0$ ($t = 0$):

$$F_2 = C + C_m \ln((C_m - C)/C_m) = -D \rho n (S/V)^2 t \quad (3)$$

На молекулярном уровне диффузионный перенос совершается под действием градиента концентрации C вещества. Коэффициент диффузии D зависит от типа пород, структуры порового пространства, влажности и других факторов. $D = \psi D_M$, ψ – фактор среды ($\psi = f$ (пористость, извилистость и т. д.)); где D_M – коэффициент молекулярной диффузии в воде.

Нами изучался процесс выщелачивания из блоков пород песчаника в прибрежной зоне долины реки Кафирниган, который определяется двумя последовательными стадиями: 1) выщелачиванием из периферической области с повышенным содержанием доломита и пониженным гипса (наиболее медленная) и 2) из области с фоновыми значениями доломита (быстрая). По данным лабораторных исследований, среднее значение коэффициента диффузии (D) ионов Ca^{2+} во второй области на 70% выше, чем в первой. Коэффициент диффузии D для периферийных частей блока (содержащих гипс в породе $m = 1 - 2\%$) составляют диапазон $(0.56-3.57) \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, а для центральных ($m = 4 - 5\%$) – $(6.13-9.63) \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, средние значения, соответственно 2.05×10^{-6} и $7.59 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$. (25°C , песчаник *Nikfi*, бидистиллированная вода).

По литературным данным величина коэффициента диффузии ионов Ca^{2+} в водных растворах составляет $9 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ [2, 3, 4]. По другим данным – $7.92 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ [5], что сопоставимо с нашими данными. При некоторых расчетах его *apriori* полагают равным $1 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ [6, 7, 8].

По полученным нами данным, пористость периферических доломитизированных частей блоков составляет 26 – 27%, а центральных неизменных частей блоков – 24%. Таким образом, различие в пористости составляет 2 – 3%. Как отмечено в работе [9], анизотропные и неоднородные породы-коллекторы подвержены более серьезному снижению проницаемости, поскольку незначительные изменения пористости могут привести к серьезному снижению проницаемости [9].

Таким образом, доломитизация кальцита может являться причиной увеличения общей пористости горных пород: периферийные части блоков, действительно, имеют более высокие значения величины n' (26 – 27%), чем центральные (0.24). Механизм такого процесса основывается на адсорбции из растворов соединений Mg^{2+} кальцитом. Однако считается, что замещение кальцита доломитом происходит фактически при сохранении объемов и не является замещением молекулы на молекулу (в последнем случае значение n' может увеличиться вплоть до 12% [10]). При перекристаллизации кальцита в доломит значительно увеличивается проницаемость пород, а n' остается почти без изменений. Поэтому более низкие значения содержания гипса в периферийной части блоков, чем в центральной объясняются, по-видимому, растворением гипса за счет увеличения проницаемости при доломитизации пород. Если предположить, что D_M (среднее значение) $\approx 8.5 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, - в поровом пространстве

песчаников, то фактор среды ψ , за счет доломитизации кальцитового цемента, уменьшается примерно в 4 раза.

Литература

1. Лебедев А.Л., Лехов А.В., Соколов В.Н., Свиточ Н.А. Скорость выщелачивания гипса из порового пространства песчаников // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология, Геокриология. 2003. № 5. С. 438–447.
2. Dutka F, Starchenko V., Osselin F., Magni S., Szymczak P., Ladd A. // Chemical Geology. 2020. V. 540. P.119459.
3. Barton A. F., Wilde N. N. // Trans. Faraday.Soc.1971. V.67. P. 3590 – 3597.
4. Jeschke A. A., Vosbeck K., Dreybrodt W. // Geochim. Cosmochim. Acta. 2001.V. 65(1). P. 27-34.
5. Mbogoro M. M., Snowden M. E., Edwards M. A. // J. Phys. Chem.2011.V. 115. P.10147-10154.
6. Raines M.A., Dewers T. (1997). Chem. Geol. 140, 29-48;
7. Dreybrodt W., Gabrovsek F. (2000) Chem. Geol. 168, 169-172;
8. Colombani J., Bert J. (2007) Geochim. Cosmochim.Acta 71, 1913-1920].
9. Masoudi M., Nooraiepour M., Hang Deng and Helge Hellevang, Preprint EarthArXiv, January 2024, DOI: 10.31223/X56Q41.
10. Петтиджон Ф. Дж. Осадочные породы. М.: Недра, 1981. 751 с.

О ПРОБЛЕМАХ ХРАНЕНИЯ СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ ПРИ ДОБЫЧЕ КАЛИЙНОЙ СОЛИ

Т.Г. Шимко, В.Л. Воронин, М.Л. Кулешова, А.П. Пензев, М.А. Царёв

На предприятиях по производству калийных удобрений накапливается большое количество отходов, как в виде отвалов горной породы, так и в виде соляных шламов. Шламохранилища являются одним из основных источников загрязнения водных объектов и почв на прилегающей территории, приводящего к гибели растительности и в отдельных случаях к выходу из строя источников питьевого и технического водоснабжения. Концентрация рассолов в них достигает 320 г/л. Эта проблема особенно остро стоит на территориях, где породы основания не обладают противofильтрационными свойствами. Такие неблагоприятные геологические условия характерны для одного из основных регионов по добыче калийной соли в нашей стране – района Нижнекамского месторождения в Пермском крае. Здесь в основании шламохранилища одного из калийных предприятий залегают породы пестроцветных кор выветривания, характеризующиеся плохо ориентированным в пространстве залеганием и трещиноватостью. Для снижения утечек солевых растворов из шламохранилища и их распространения в подземные воды и поверхностные водотоки на предприятии планируется создание противofильтрационных экранов в основании дамбы и в бортовых примыканиях. В лаборатории ЛОГС выполнены исследования по обоснованию возможности применения и испытанию эффективности инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы и коллоидного кремнезема для создания противofильтрационной завесы, препятствующей распространению рассолов из шламохранилища.

Целью исследований было обоснование возможности применения для сооружения противofильтрационной завесы в агрессивной солевой среде химического инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы и коллоидного кремнезема.

В задачи исследования входило:

- изучение поведения инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы и коллоидного кремнезема в условиях агрессивной солевой среды в ходе проведения комплекса лабораторных исследований по закреплению песков;
- испытание инъекционного раствора на опытных участках в полевых условиях.

В исследованиях использовался химический инъекционный раствор, который был разработан на кафедре экологической и инженерной геологии геологического факультета МГУ [1] и изначально предназначался для придания высокой прочности при инъекционном закреплении грунтов (состав раствора: коллоидный кремнезем – эпоксидная смола – полиэтиленполиамин в соотношении 3:1:0,16). Изучение его эффективности для закрепления грунтов в условиях агрессивной солевой среды с целью обоснования возможности сооружения

противофильтрационных барьеров (ПФЗ) проводилось впервые. Основанием для предположения о возможности применения этого нового раствора послужило то, что в 1980-х годах для изоляции соляного оголовка в основании Рогунской ГЭС в Таджикистане [2,3] был разработан (также на кафедре инженерной геологии геологического факультета) раствор на основе эпоксидной смолы, который прошел успешные опытные испытания, но не был применен в производстве, т.к. все работы на Рогунской ГЭС были остановлены после 1990 г.

Лабораторные исследования

В лабораторных условиях инъекционная обработка песчаных грунтов проводилась в инъекционных колоннах, а также на физической модели, вмещающей 135 кг песка. Инъекционная установка представляет собой разборную колонну, состоящую из цилиндрических секций высотой 50 мм и диаметром 25 мм каждая секция. Пески закреплялись в состояниях: воздушно сухом, водонасыщенном и насыщенном раствором соли (с концентрацией NaCl 240 г/л). Затем закрепленные образцы выдерживались в соответствующей среде: в воздушно-влажной, в воде и в растворе соли в течение не менее 28 сут., после чего определялись их физико-механические свойства.

Максимальные значения прочности получены для образцов, закрепленных и хранившихся в воздушно-влажных условиях - до 1,13 МПа. Для водонасыщенного и закрепленного в соляном растворе песка прочность на одноосное сжатие ниже, однако, она, тем не менее, значительна - 0,57-0,46 МПа. На рис. 1 показана прочность образцов, закрепленных в разных условиях на колоннах.

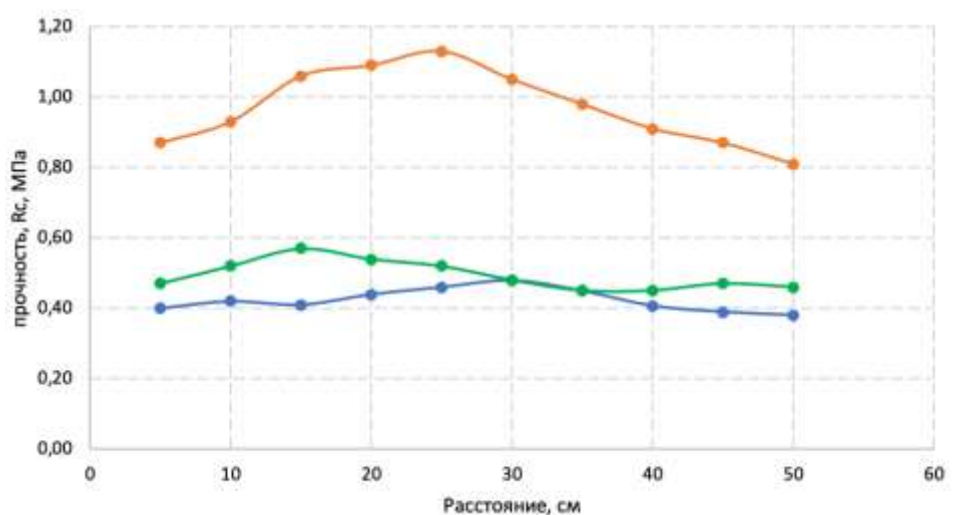


Рис. 1. График изменения прочности образцов, закрепленных в инъекционных колоннах, по радиусу закрепления; оранжевым – воздушно-влажные, зеленым – водонасыщенные, синим – насыщенные рассолом

В целом выполненные лабораторные исследования прочности на одноосное сжатие песка, закрепленного на колоннах в различных вариантах исходного состояния песка и

хранения показывают, что прочность закрепления существенна и достигает для худших условий 0,4-0,5 МПа.

Для изучения параметров инъекционного процесса и результатов закрепления песчаного грунта была сконструирована и изготовлена физическая модель закрепляемого массива (автор – А.П. Пензев) с возможностью проводить инъекцию (рис. 2). Главным преимуществом физического моделирования является возможность полноценного контроля и наблюдения за инъекционными экспериментами в лабораторных условиях.



Рис.2. Внешний вид физической модели

Для инъекции песков на модели использовался песчаный грунт, аналогичный по гранулометрическому и минеральному составу песку, отобранному из дамбы шламохранилища, в основании которой предполагалось создавать противофильтрационную завесу. Эксперименты по физическому моделированию на показанной на рис. 2 установке проводились на воздушно-сухих и водонасыщенных песчаных грунтах. Насыщенные соевым раствором пески закреплялись на другой установке из оргстекла, во избежание вывода из строя модели из металла.

Инъекция проводилась методом пропитки через иньектор – перфорированную трубку, расположенную в середине модели. Скорость распространения раствора контролировалась визуально через стенку, выполненную из прозрачного поликарбоната. В результате, общий объем закрепленного грунта составил около 0,04 м³. Набор прочности грунтового композита происходил в течение 28 сут, после чего физическая модель разбиралась для отбора проб и дальнейших испытаний закрепленных образцов.

Испытания на физической модели позволили получить данные об объемном распределении показателей модифицированного грунта. На рис. 3 приведены значения прочности образцов, закрепленных и хранившихся в воздушно-влажном состоянии, на разном расстоянии от иньектора.

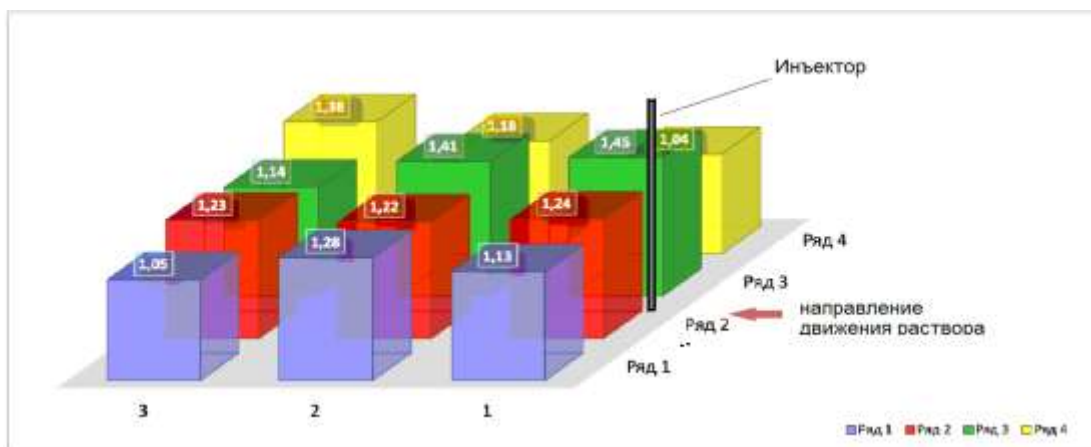


Рис. 3 Распределение прочности в закреплённом массиве (МПа)

По полученным данным, распределение в массиве прочности закрепления не зависит от удаленности от точки инъекции. В среднем значения прочности составили от 1,1 до 1,4 МПа.

Прочности закрепления образцов в водонасыщенном состоянии на физмодели мало отличаются от сухих образцов и составляют 0,9-1,2 МПа.

Прочность на одноосное сжатие песков, закреплённых в состоянии насыщения соевым раствором, показана на рис. 4. Значения прочности на разном расстоянии от инъектора составили от 0,6 до 0,7 МПа, что ниже прочности закрепления в сухом и водонасыщенном состоянии, тем не менее, это достаточно высокие значения.

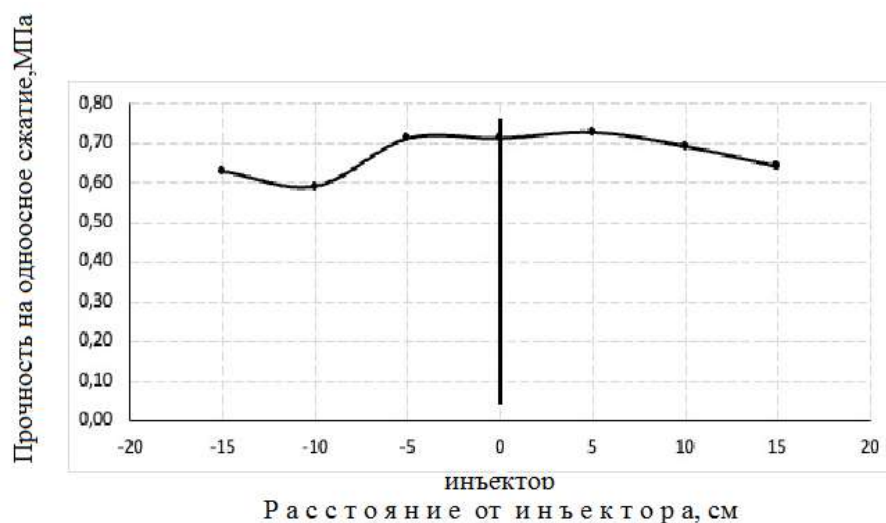


Рис. 4. Прочность песка, закреплённого в состоянии насыщения рассолом.

Полевые испытания

Опытная инъекция химического раствора на основе алифатической эпоксидной смолы выполнялась на двух участках в районе шламохранилища.

Площадка 1 была сложена песками дамбы шламохранилища и представляла собой толщу насыпных песчаных грунтов в основании дамбы. Инъекция раствора проводилась в интервале

1-3 м от поверхности через три предварительно пробуренные скважины с помощью тампона, установленного на глубине 1 м.

Площадка 2 представляла собой естественную поверхность в пределах водораздела, сложенную пестроцветной толщей полускальных выветрелых пород, перекрытых делювием мощностью 2-2,5 м. В разрезе площадки 2 присутствуют полускальные выветрелые грунты – коренные породы, характерные для боковых примыканий хранилища. Для заполнения крупных пустот вначале была выполнена инъекция цементного раствора, затем, через другие скважины, выполнена инъекция эпоксидного раствора в две скважины в интервале глубин от 2 до 4 м от поверхности.

После проведения инъекции на опытных площадках и выстойки в течение 7-5 дней были вскрыты шурфы и произведен отбор образцов для изучения свойств закрепленных грунтов в лаборатории. Опытные работы проводились в условиях, когда температура была близка к 0° , что позволило оценить поведение гелеобразующего раствора при низких температурах.

Изучение фильтрационных параметров закрепленных песков

Фильтрационные опыты на лабораторных и полевых образцах закрепленного песка выполнены с использованием водопроводной воды и солевого раствора из шламохранилища.

Для точного расчета коэффициента фильтрации (по воде) и коэффициента проницаемости (по рассолу) определены коэффициенты кинематической вязкости воды и рассола по ГОСТ 33768—2015 [4].

Фильтрационные испытания проведены на приборе ПКФ-01 и на авторской установке (автор – М.А. Царев [5], устроенной по принципу, изложенному в ГОСТ 12730.5–2018 [6]. Установка отличается применением инертных материалов, контактирующих с раствором (полиэтилен, полипропилен, сополимеры стирола), а также позволяет устанавливать заданное давление раствора (воды), контролировать температуру и давление, функционирует в автоматическом режиме и позволяет проводить длительные эксперименты.

Проведение фильтрационных экспериментов на образцах песков, закрепленных в разных условиях в лаборатории и на опытных площадках, позволили получить следующие обобщенные результаты.

Коэффициент фильтрации песка, закрепленного в воздушно-сухом состоянии, составил в среднем 3×10^{-5} м/сут. Проницаемость закрепленного в рассоле песка при фильтрации через него рассола, с учетом вязкости последнего, составила величины 0,2-0,4 Дарси (1Д примерно равен 1 м/сут). K_f исходного песка - 2,3-2,5 м/сут. При фильтрации рассола наблюдалось существенное снижение расхода в процессе длительного опыта, что связано или с выпадением солей в поровом пространстве, или с взаимодействием рассола с компонентами инъекционного раствора (коллоидным кремнеземом), или с обоими этими процессами.

Выводы

Выполненные исследования инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы, коллоидного кремнезема и отвердителя полиэтиленполиамиона (ПЭПА) в качестве материала для создания противofильтрационной завесы для защиты от утечек из шламохранилища калийнодобывающего предприятия позволили сделать следующие выводы.

1. Раствор обладает свойствами, характеризующими его как перспективный химический инъекционный раствор. Эти свойства: низкая вязкость, хорошо регулируемое время гелеобразования с длительным периодом пребывания в состоянии раствора с исходной вязкостью и быстрым переходом в состояние полимера. Испытания в полевых условиях выявили еще одно важное свойство раствора, а именно, способность проходить гелеобразование при низких температурах и увеличенном из-за этого времени гелеобразования.

3. Прочность на одноосное сжатие песчаных грунтов, закрепленных и хранившихся в рассоле, снижается по сравнению с образцами, закрепленными не в агрессивной среде, однако она остается достаточно высокой – 0,6-0,8 МПа.

7. Изучение фильтрационных свойств в ходе длительной фильтрации пресной воды через образцы закрепленного сухого песка из физической модели получены значения K_f в интервале $2.7 \cdot 10^{-5}$ - $3.6 \cdot 10^{-5}$ м/сут. Проницаемость образцов песка, закрепленного в состоянии насыщения рассолом, при фильтрации через них солевого раствора составила от 0,2 до 0,49 Дарси (Дарси=м/сут). То есть, по сравнению с закрепленным сухим песком коэффициент фильтрации увеличился на четыре порядка, однако снизился по сравнению с исходным на порядок. При этом отмечено снижение проницаемости во времени при фильтрации рассола.

Возможное объяснение недостаточного снижения проницаемости закрепленного в рассоле песка может заключаться в ошибках при проведении экспериментов. Из-за низкой вязкости раствора при инъекции на модели он имеет возможность растекаться после остановки закачки. Если раствор не испытывает сопротивления, которое бы позволило поднять давление инъекции, происходит «растекание» в поровом пространстве песка. Из-за физико-химических особенностей раствора, а именно, высокой смачивающей способности, он стремится в первую очередь смочить поверхность песчаных частиц, а во вторую – заполнить поры. Таким, образом, с одной стороны, это хорошая особенность – высокая проникающая способность, а с другой – требуется, чтобы давление инъекции в процессе закачки было достаточным для заполнения пор. При закреплении в колонне было достигнуто достаточное давление для полного заполнения порового пространства песка. А при инъекции на физической модели недостаточная пригрузка песка сверху и взвешивающее давление рассола на частицы песка могло привести к его разуплотнению, в результате чего поры песка не были заполнены максимально полно.

Испытания в полевых условиях на площадке 1 в песке также не позволили достичь полного заполнения порового пространства химическим раствором из-за обнаружившихся при вскрытии пустот в песчаном массиве, поэтому инъекция произошла при давлении практически ниже 1 атм. Лучшие результаты были получены на втором участке с алевролитами, где крупные трещины были заполнены цементным раствором, а мелкие – химическим раствором под некоторым давлением.

Проведенные исследования показали, что разработанный раствор на основе эпоксидной смолы может рассматриваться как перспективный для создания ПФЗ в условиях агрессивной солевой среды. Однако для принятия окончательных решений требуются дополнительные исследования.

Литература

1. Патент «Инъекционный раствор для закрепления пескосодержащего массива». Авторы Пензев Антон Петрович (RU), Самарин Евгений Николаевич (RU). ИЗ №2785603. Опубликовано: 09.12.2022 Бюл. № 34. – М., 2022. – С. 442.
2. Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Емельянов С.Н., Ларионова Н.А., Сергеев В.И. Опыт применения инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы для уплотнения скальных осадочных пород в районе створа Рогунской ГЭС. В ж. «Гидротехническое строительство», издательство Энергопрогресс (М.), 1981 № 10, с. 15-18.
3. Сергеев В.И., Воронкевич С.Д., Емельянов С.Н. Исследование фильтрационно-осмотических процессов при создании плотных противofiltrационных экранов (на примере Рогунской ГЭС). В сборнике «Задачи механики природных процессов», место издания Издательство МГУ Москва, 1983.
4. ГОСТ 33768-2015 Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей. [Электронный ресурс]. – <https://internet-law.ru/gosts/gost/63170/?ysclid=loo3kw4yv9507582366>
5. Царев М. А. Результаты использования экспериментального фильтрационного комплекса с автоматизированной системой сбора информации для оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов / М. А. Царев // Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»
6. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pgbinmsk.ru/gosts/12730.5-2018.pdf?ysclid=llp5rcljsz795141564>

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ КОНСОЛИДАЦИЯ СИЛЬНОДЕФОРМИРУЕМЫХ ГРУНТОВ

М.В. Лехов

Консолидация, процессы деформации грунтовых толщ и дренажа отжима фильтрата, имеет особенное значение в прогнозировании влияния геологических и техногенных факторов на безопасность хозяйственной деятельности в части проектирования и эксплуатации крупных хранилищ депонирования илового осадка сточных вод городских агломераций. С задачами тесно связаны проблемы рекультивации территорий, загрязнения подземных и поверхностных вод, осадочных деформаций.

Эффективность реализации проектных решений в отношении одной из наиболее серьезных проблем – захоронении илового осадка сточных вод, накапливающегося в гигантских объемах в крупных городах, - зависит от переменных в процессе деформирования параметров проницаемости и, в целом, характеристик свойств среды. В консолидации илового осадка весьма показательно отражается нелинейность процесса, обусловленного взаимозависимостью характеристик.

Характеристика процесса и грунта

Определяющий фактор процесса - гравитационный. Вес массива обуславливает отжим фильтрата из сжимающегося порового пространства. Процесс сопровождается ростом порового давления, напоров, и, следовательно, уменьшением эффективных напряжений. Получается торможение уплотнения и оттока фильтрата. Консолидация иловых грунтов длится десятки и даже сотни лет – время почти геологического масштаба.

Увеличение напоров, в свою очередь, означает возникновение фильтрационной силы, весьма значительной, если на границе толщи обеспечен беспрепятственный дренаж. Нисходящая фильтрационная сила - в отличие от взвешивания – напротив, способствует уплотнению грунта.

Результатом действия взаимосвязанных и разнонаправленных процессов является неравномерное изменение и распределение характеристик свойств грунтов в консолидируемой толще. Как показывают расчеты, которые подтверждаются данными бурения старых карт, в которых десятилетиями накапливался осадок, в толще иловых грунтов, существенно уплотняется тонкая подошвенная зона, ее проницаемость снижается на порядки. В результате затрудняется нисходящий отжим фильтрата (дренаж), и вышележащая часть толщи на многие десятилетия остается практически в исходном разуплотненном, избыточно водонасыщенном состоянии.

Создание модели, обеспечивающей учет нелинейной взаимосвязи процессов и фильтрационных и деформационных параметров, имеет практическое значение – позволяет обосновать конструкцию сооружения депонирования техногенных грунтов, определить

мероприятия по рекультивации оседающей поверхности земли, спроектировать дренаж и производительность станции очистки фильтрата.

Иловый осадок на Марьинском объекте депонирования однороден по гранулометрическому составу. После обработки в нем отсутствуют частицы больше 1 мм, глинистые частицы составляют менее 10%. Преобладает пылеватая фракция 0,001-0,05 мм. Состав осложняется наличием органического мусора. Привезенный осадок имеет объемную влажность 76 – 81%, весовую до 250%. В отвале осадок интенсивно набирает дождевую и талую воду.

Происходит выравнивание влажности по глубине. На поверхности влажность уменьшается за счет эвапотранспирации. Развитие корней растений является наилучшим способом забора не только свободной, но и связанной влаги, что влияет на формирование прочности.

Как следствие избыточного водонасыщения в условиях незначительного давления нагружаемой толщи - грунт приобретает предельную влажность набухания. Несмотря на усилия по обезвоживанию на станции обработки осадка сточных вод через 2 месяца весовая влажность увеличивалась до 280%. Испытания через 6 лет показали, что она достигла предельных значений 340 - 370%.

Модель

Модель исходит из того, что при значительном превосходстве плановых размеров над мощностью толщи для оценки осадки и расхода отжима вверх и вниз справедливо допущение одномерного, вертикального, характера фильтрации и развития деформации. Зависимость параметров системы вода-порода от искомой функции напоров определяет нелинейный характер уравнения, что требует учета в алгоритме численного решения.

В формализации участвуют вертикальная координата, время, коэффициент пористости, пористость, плотность воды, объемный вес воды, гидростатическое давление, напор, коэффициент упругоэластичности, коэффициент фильтрации, коэффициент объемного сжатия воды, коэффициент сжимаемости, скорость фильтрации, или расход, удельный по площади сечения потока, эффективное напряжение, полное напряжение.

Изменение массы воды в объеме элемента единичной площади и переменной высоты определяется отдачей массы воды из сжимаемого порового пространства с учетом изменения ее плотности. Из закона сохранения массы следует вывод уравнения неразрывности.

Для вывода дифференциального уравнения используется привычный вид закона компрессии в дифференциальной форме. Закон Гука описывает изменение плотности воды.

Объем твердого скелета в сжимаемом объеме с переменной во времени пористостью неизменен. Поэтому деформационная осадка пропорциональна изменению коэффициента пористости.

В алгоритме численной схемы производится финальный пошаговый расчет осадки путем интегрирования по мощности толщи и времени. Задача состоит в том, чтобы связать процесс фильтрации под давлением вышележащей толщи с изменением пористости.

Если скорость перемещения частиц (деформации скелета) мала в сравнении со скоростью фильтрации, при малых градиентах она линейно зависит от градиента и определяется законом Дарси. В иловых грунтах с высокой степени сжимаемости пренебрежение скоростью перемещения скелета условно. В начальный период в подошве уплотнение происходит быстро. Для полноты картины может быть использован закон Дарси-Герсеванова, включающий скорость изменения положения частиц скелета. В дальнейшем эта позиция требует экспериментального обоснования. Но, как показано ниже, рассматриваемая модель по сути учитывает «сползание» расчетных точек по вертикали в ходе нестационарного процесса.

Сжатие грунта описывается законом компрессии, где коэффициент сжимаемости всегда является переменной величиной, что делает закон нелинейным и требует поиска линейной зависимости. Сжатие под собственным весом водонасыщенного грунта, определяемому эффективными напряжениями, препятствует взвешивающее давление.

Дифференциальное уравнение процесса следует из законов сохранения массы, компрессии и фильтрации и уравнения неразрывности.

Упругая фильтрация инициируется изменением нагрузки на слой, которое определяет временный источник с интенсивностью. После накопления осадка источник исчезает, но процесс консолидации продолжается.

Все коэффициенты уравнения зависят от условий уплотнения и переменны, что определяет нелинейный характер модели и делает невозможным аналитическое решение. Для решения необходимы зависимости изменения коэффициента сжимаемости и коэффициента фильтрации от переменных характеристик состояния грунта.

Коэффициент сжимаемости может рассчитываться, исходя из эмпирических зависимостей, полученных на основе обобщения испытаний грунтов. Наиболее универсальным для сильно сжимаемых грунтов представляется экспоненциальный характер компрессии. Но требуется еще и параметр конечной пористости.

Примечательным оказывается предположение о гиперболическом характере компрессии с одной только константой, который при малых нагрузках дает очень высокую корреляцию данных.

Не менее значимым для модели является связь проницаемости с уплотнением деформируемого порового пространства. Для аналогичных грунтов известна логарифмическая связь проницаемости и плотности.

Формализация граничных условий охватывает случаи накопления илового осадка и его дальнейшего уплотнения, которые предусмотрены при разработке программного обеспечения моделирования.

Решение задачи

Численное решение уравнения упругой фильтрации осуществляется методом Бубнова-Галеркина с дискретизацией области на конечные элементы. Пошаговое решение дает поле напоров, которое используется для процедуры пересчета геометрии элементов, напряжений, пористости, проницаемости, изменяющихся в ходе процесса. Решение – явно-неявное (итерационное) по параметрам и неявное по напорам.

Исследовательская сторона требует прослеживания деформации, проницаемости, показателей свойств грунта во времени и в разрезе. Для этих целей разработана программа моделирования с нелинейными параметрами и граничными условиями для основных типов фильтрации в деформируемой среде. Программа на определенном этапе разработки вышла за рамки задач накопления илового осадка. Может использоваться в качестве инструмента исследования осадки поверхности земли при водопонижении, деформации и водоотдаче слоев при опытных откачках и других явлений.

Выводы из экспериментов

Одним из вопросов является целесообразность экранирования депонированных грунтов с укладкой слабопроницаемых сорбирующих материалов в основании. Расчеты показали, что на подошве 10-метрового слоя специфических грунтов расход не становится меньше, если в его основание уложен экран с коэффициентом перетока 0,00014 л/сут. Замедление осадки становится ощутимым в сравнении с неэкранированным вариантом достигается через несколько лет. Таким образом, бесспорное в обычном представлении желание изолировать токсичную массу от окружающей среды становится позицией спорной, если учесть экономическую сторону строительства.

Вывод получен для подтопленной в условиях длительной эксплуатации подошвы депонируемого массива, что соответствует наиболее реальной гидрогеологической ситуации. Оседание длится десятилетиями, суммарная деформация слоя достигает 45%. В перспективе полигон захоронения так и остается непригодной и нестабильной территорией.

В то же время, расход фильтрата в нижележащий горизонт оказывается весьма умеренным. Даже для полигонов с размерами в сотни метров суммарный расход составит в первые годы единицы кубометров в час, затем десятые доли. При таких показателях не требуется

дренаж из мощных скважин, – нужна продуманная экологическая концепция локализации и разбавления загрязнения.

Закономерен вопрос о причинах характера процесса - длительного и не зависящего от такого сильного мероприятия, каковым является экранирование.

В самом начале накопления илового осадка проявляются два главных фактора – формируются избыточные напоры и уплотняется самая нижняя зона. Результатом оказывается еще большее разуплотнение, взвешивание грунтов и набор влаги извне, что и подтвердилось изысканиями. Расчет эффективных напряжений дает отрицательные значения, толща фактически готова к всплыванию, превращается в трясину. Поэтому уплотнение и не происходит очень длительное время.

На подошве, напротив, происходит практически мгновенный рост эффективных напряжений, сжатие и формирование тонкого слоя консолидированного грунта с очень низкой проницаемостью. Он кольматирует дно, препятствует отжиму фильтрата и, таким образом, дренажу порового пространства. Отсюда следует вывод о бесполезности в основании хранилищ искусственных экранов, так как даже очень низкая их проницаемость оказывается соизмеримой, и даже больше проницаемости уплотненного илового грунта. Модель объясняет природу сильной кольматации старых иловых карт, в которых не происходит потеря влаги и уплотнение осадка.

Геодезическая съемка через 10 лет с высокой точностью подтвердила расчеты осадки поверхности, расчеты расходов подтвердили наблюдения по дренажу.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ СТРУКТУР БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ (ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ)

А.В. Гаврилов, Е.И. Пижанкова

Современные доступные в Интернете изображения поверхности Земли, представляют собой мозаику из космоснимков с высоким пространственным разрешением (до 2 м). Поэтому на них находит отражение микрорельеф, свойственный криогенным образованиям, включая полигонально-жильные структуры (ПЖС). На мозаике Esri WorldImagery, являющейся глобальным покрытием, в настоящее время отображается крупнополигональный микрорельеф в береговой зоне арктических морей, который формируется в засоленных прибрежно- и лагунно-морских отложениях.

Целью исследований являлось установление фациальных условий формирования этих структур. Методика исследований строилась на основании совместного анализа спутниковых и наземных данных. Наземные фактические данные представлены опубликованными материалами по строению и засоленности полигонально-жильных льдов на Ямале [Баду, 2021], о. Белый [Васильчук, Трофимов, 1984; Слагода и др., 2014], в низовьях Колымы [Зайцев, Кузнецова, 1975; Зайцев, 1976], на о. Хейса (арх. Земля Франца-Иосифа) [Слагода и др., 2015; Дроздов и др., 2011], засоленности вмещающих отложений, которая варьирует от 0,4 до 2 г/л.

Крупнополигональный микрорельеф с размером полигонов в 70-100 м, являющийся индикатором сингенетических полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) в прибрежно-морских отложениях, в полевых условиях наблюдался и изучался только в низовьях Колымы. Примерно такой же размер полигонов зафиксирован при наземных исследованиях на о. Хейса [Дроздов и др., 2011]. Подобный размер (до 100-150 м) имеют полигоны на косах лагуны Нерпалах о. Котельный, побережье о-вов Банкс и Виктория Канадского арктического архипелага и во многих других местах береговой зоны арктических морей (рис. 1). То-есть, данные наземные соответствуют спутниковым изображениям.

Наземными исследованиями на острове Котельном зарегистрирован ряд выразительных гидрологических явлений теплого сезона. Об их масштабе можно судить по расходу соленой морской воды, перетекающей из моря в лагуну и обратно по одной из морозобойных трещин в сезонно-талом слое во время прилива и отлива (10-15 л/сек) [Неизвестнов, 1974]. В донных осадках мелководных лагун ледяные жилы, как правило, летом вытаивают, образуя заполненные водой протяженные канавы. В далекой от моря внутренней зоне характерно образование сезонных водоносных горизонтов мощностью 0,2-0,5 м с пресными водами, существующими в морозобойных трещинах с июня по сентябрь. Указанные явления определяют выразительность изображения полигонального микрорельефа на космоснимках.



Рис. 1. Примеры крупнопolygonального микрорельефа в береговой зоне арктических морей, выявленные на детальных космоснимках мозаики Esri WorldImagery [<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>].

Для фаций пересыпей западного побережья губы Буор-Хая, отгородивших лагуны от моря и превративших их в озера Гавриил-Кюэле и Хабырыс-Кюэле, получено семь ^{14}C датировок от 4,3 до 1 тыс.л.н. [Правкин и др., 2019]. Пересыпи представлены генерациями сомкнутых береговых валов. Они подняты над современным уровнем моря на 3-4 м. Береговым валам по дистанционным данным свойствен крупнопolygonальный микрорельеф современного вида с поперечником полигонов до 100-150 м (рис. 2).

На основании наземных и спутниковых данных все выделяемые по мозаике Esri WorldImagery отложения в стратиграфическом отношении подразделяются на три группы комплексов: 1) позднеголоценовых – современных; 2) ранне- среднеголоценовых и 3) голоценовых отложений. Первый отображается на мозаике космоснимков четким крупнопolygonальным рельефом (рис. 3). Второй перекрыт субаэральными образованиями, которым в западном секторе евразийской Арктики свойственны субаэральные ПЖЛ, формирующие микрорельеф с полигонами обычного (10-25 м) размера. Третий развит в области полярных ледников. Современные осадки выделяются крупнопolygonальным микрорельефом, для выделения голоценовых отложений необходим тщательный анализ дистанционных данных.



Рис. 2. Серия датированных береговых валов с полигонально-жильными структурами, отгородивших лагуну от моря и превративших её в озеро (оз. Гавриил-Кюэле) [по данным: Правкин и др., 2019].

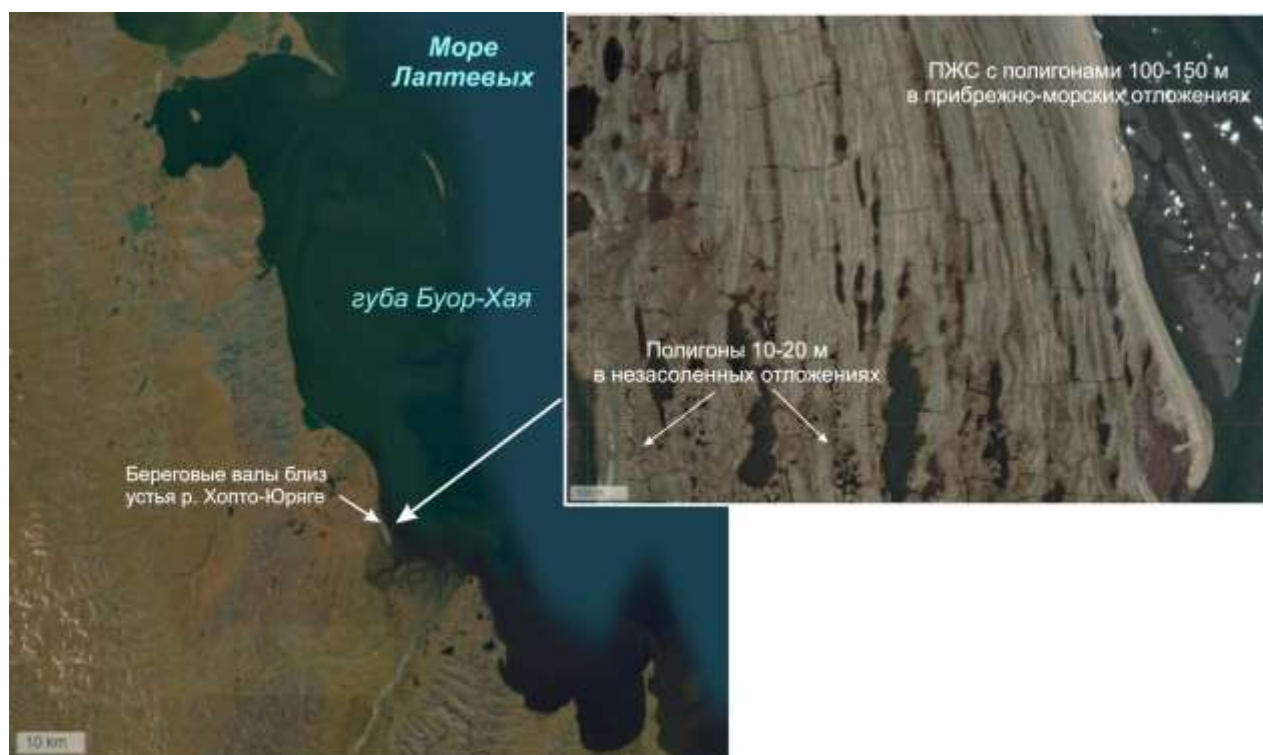


Рис. 3. Полигональные структуры на аккумулятивных образованиях побережья моря Лаптевых (близ устья р. Хопто-Юряге).

В результате дешифрирования мозаики Esri WorldImagery всей Арктики и наземных исследований на этапе современного потепления выделены следующие фации и стратиграфо-генетические комплексы отложений:

- 1) комплекс ранне-среднеголоценовых отложений:
 - а) прибрежно-морских,
 - б) лагунных;
- 2) комплекс позднеголоценовых – современных отложений:
 - а) лагунных,
 - б) прибрежно-морских (формирующихся прибрежно-морских террас),
 - в) аллювиально-морских (влияние морских ветровых нагонов);
- 3) комплекс голоценовых прибрежно-морских отложений областей оледенений;
- 4) фации участков дегляциации современных полярных ледников.

Прибрежно-морские террасы полярных ледников разновозрастные, но малые их площади и трудности выделения служат основанием их объединения в рамках единого генетического типа.

Комплекс ранне-среднеголоценовых прибрежно-морских отложений составляет основание морских террас. Он перекрыт субаэральными образованиями, поскольку террасы уже тысячелетиями находятся на субаэральном этапе развития.

Наиболее представлен на шельфе по дистанционным данным комплекс позднеголоценовых-современных лагунных отложений. По глубине моря выделяются комплекс мелководных лагун и комплекс лагун со средними глубинами моря. Первый из них с глубинами моря менее мощности сезонных льдов характеризуется незначительным распространением ПЖС (рис. 4). Несмотря на различия в литологии и влажности отложений, их площади представлены единой сетью как в пределах надводных аккумулятивных образований – береговых валов, баров, кос, пересыпей, так и почти по всей площади днища лагун (восточное побережье о. Бельковский, о. Пологий-Сергеева, о-ва Известий ЦИК).

На подавляющей части шельфа осадконакопление и формирование ПЖС находится в начальной фазе. Поэтому лагуны не столь мелководны. Образование ПЖС имеет место исключительно при переходе внутренних дисперсных берегов пересыпей, а также кос, баров, береговых валов в надводное положение. Указанная фаза развития является характерной для береговой зоны восточной части моря Лаптевых, западной – Восточно-Сибирского, Притаймырского мелководья, о-вов Котельный, Банкс, Виктории.

Отложения формирующейся морской террасы высотой 2-4 м свойственны северо-восточному и северному побережью острова Северный (арх. Новая Земля). Полигоны безваликовые, четкие. Размер до 100-120 м. Там, где распространены снежники, их размер

сокращается до 60-70 м. Наземных сведений о наличии полигонального микрорельефа на современной морской террасе Новой Земли у авторов нет, однако такой микрорельеф наблюдался на мысе Желания [Бартова, 2023].



Рис. 4. Мелководная лагуна, занятая системами береговых баров с полигонально-жильными комплексами, объединяющими бары с межбаровыми понижениями в единую полигональную систему (юго-восточный берег острова Бельковский в море Лаптевых).

Комплекс современных аллювиально-морских отложений широко распространен в зонах морских ветровых нагонов в низовьях долин рек, современных грабен (грабены оз. Бустах, р. Чуркун, Гальваамский Яно-Колымской низменности), участков морских террас. Участки крупнополигонального микрорельефа в нагонных частях днищ долин рек (рис. 5) являются удобным местом для установления его связи с засолением отложений. В голоцене также широко были развиты ветровые нагоны. Три галечно-щебнистые волноприбойные косы с расчетным возрастом $7,5 \pm 1,5$; $3,2 \pm 0,5$; $2,1 \pm 0,4$ тыс. лет назад [Тараканов, Новиков, 1976] свидетельствуют о снижении уровня моря после среднеголоценового максимума [Гаврилов и др., 2006].

ПЖС ранне-среднеголоценового прибрежно- и лагунно-морского комплекса находятся в основном в реликтовом состоянии [Васильчук, Трофимов, 1984; Бадю, 2021]. Единственное место с минерализованными ПЖЛ и полигонами 70×100 м в засоленных прибрежно-морских отложениях, описанных в 1970-х гг. Зайцевым и Кузнецовой [1975, 1976] на материалах дистанционного зондирования (Esri WorldImagery) найти не удалось. В другом месте в центральной части террасы ПЖЛ по данным этих авторов в 1970-х гг. только начинали формироваться. Это обстоятельство, а главным образом, картина постоянного переформирования (районы Меркушиной стрелки, п-ова Лопатка, низовий Колымы, оз. Бустах, Гальваамского грабена) показывает его трансформацию на субэральном этапе развития террасы. Наиболее распространенным видом являются почти квадратные полигональные ванны размером

до 80-100 м, разделяемые валиками шириной 7-17 м, которые также делятся пополам обводненной канавой.



Рис. 5. Полигональные структуры низовий долины р. Уэле.

Выводы

1. По данным мозаики КС береговой зоны арктических морей прибрежно- и лагунно-морское осадконакопление отделяется от субэдрального характером полигонального микрорельефа. Первому свойствен крупнополигональный микрорельеф с размером полигонов от 50 до 120-150 м. Второму свойствен обычный для суши полигональный микрорельеф размером от 7-10 до 25-30 м.
2. По времени существования обстановок осадконакопления в береговой зоне на основе космических данных можно выявить два временных интервала: первый – позднеголоцен-современный, второй – ранне-средне-голоцен-современный. Первый характеризуется четко выраженным крупнополигональным микрорельефом, который является индикатором полигонально-жильных структур. О существовании в прошлом второго в Восточно-Сибирской Арктике можно только судить, восстанавливая его по современному термокарстовому микрорельефу голоценовых морских террас.
3. По данным дистанционного зондирования выделены стратиграфо-генетические комплексы отложений, содержащие ПЖС.
4. Информация о развитии ПЖС содержится на открытых материалах дистанционного зондирования Esri WorldImagery субметрового пространственного разрешения. Они обладают способностью отображать различные виды полигонального микрорельефа и фациальных условий формирования синкриогенных осадков и парагенетически связанных с ними повторно-жильных льдов.

Литература

- Баду Ю.Б. Криолитогенез. Признаки и призраки криолитосферы. М. Изд-во МГУ, 2021. 67 с.
- Бартова А.В. Рельеф и кайнозойские образования побережья и островов Баренцево-Карского региона // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики Северо-Запада России. Вып. 10. 2023, с. 18-29.
- Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т. О находках сильноминерализованных повторно-жильных льдов // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1984, № 8, с. 129–134.
- Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В. Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2006, т. X, №1, с. 39-50.
- Дроздов Д.С., Слагода Е.А., Абрамов А.А. и др. Предварительные результаты геокриологических исследований на острове Хейса (Земля Франца-Иосифа) // Материалы Четвертой конф. геокриологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). М., Унив. книга, 2011, с. 52–59.
- Зайцев В.Н., Кузнецова И.Л. Геокриологические условия северной части Колымской низменности (междуречье рр. Бол. Чукочьей и Коньковой) // Труды ПНИИИС, вып. 36. Геокриологические исследования при инж. изысканиях. М., Стройиздат, 1975, с. 74-84.
- 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. МГУ, 1976, 25 с.
- Неизвестнов Я.В. Мерзлотно-гидрогеологические исследования на о. Котельном // Тр. ин-та ПНИИИС, вып. 29. Геокриологические исследования при инженерных изысканиях. М., Стройиздат, 1974, с. 182-187.
- Правкин С.А., Зандер Л., Папенмайер С. и др. Рельеф и современная тектоника юго-западного побережья губы Буор-Хая, море Лаптевых // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 5., СПб, 2019, с. 22-26.
- Слагода Е.А., Курчатова А.Н., Опокина О.Л. и др. Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: Геокриологическая история и микростроение и изменения природных условий (часть 3) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 33–45.
- Слагода Е.А., Крылов А.В., Попов К.А., Опокина О.Л. и др. Криолитологическое строение отложений острова Хейса архипелага Земля Франца-Иосифа // Криосфера Земли 2015, т. XIX, № 4, с. 17–30
- Тараканов Л.В., Новиков В.Н. Применение расчетного (энергетического) метода к оценке возраста береговой линии моря Лаптевых в Ванькиной губе // Геоморфология, 1976, №3, с. 87-93.

СОСТОЯНИЕ ПОРОД (МЕРЗЛОЕ, ТАЛОЕ) ПОДНЯТИЯ ДЕ ЛОНГА
(СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ЧАСТЬ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА)
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
А.В. Гаврилов, В.В. Малахова (ИВМиМГ СО РАН), Е.И. Пижанкова

Важным методом формирования представлений об эволюции и современном распространении субаквальной мерзлоты является математическое моделирование. Это связано со значительными проблемами получения фактических данных о состоянии пород шельфа, несмотря на осуществление проекта стратиграфического бурения, которым предусмотрены геотермические наблюдения в скважинах. Однако опыт таких наблюдений при проведении групповой геологической съемки Севморгео (ныне ВНИИОкеангеология) 1973-77 гг. района Новосибирских островов и прилегающего шельфа масштаба 1:200 000 [Соловьев и др., 1981] оказался не учтенным. Он показал, что температура в 100-150 метровых скважинах восстанавливается по окончании бурения не менее, чем за 15-20 суток, а в более глубоких скважинах период восстановления еще продолжительнее.

Термометрия в настоящее время осуществляется в скважинах, выстойка которых недостаточна для восстановления естественного теплового режима в массиве пород. Такая скважина - DL-1, где глубина моря составляет 47 м, - была пробурена на северо-западе Восточно-Сибирского шельфа (поднятие Де Лонга) [Петров и др., 2023] до глубины 472 м от поверхности дна с отбором керна до глубины 268 м. Температурные измерения в ней проведены до глубины 246 м в процессе бурения и по прошествии пяти дней с его окончания. Температуры составили от -1.3°C на глубине годовых колебаний до $+5^{\circ}\text{C}$.

Проектом, к сожалению, не предусмотрен отбор образцов для определения состава пород, их теплофизических и водно-физических свойств, солености поровой влаги по всему разрезу. Этот вид исследований является необходимым для характеристики теплового поля пород и его изменения во времени, его необходимо включить в перечень работ в будущем.

Численное моделирование распространения и мощности мерзлых пород за 200 тыс. лет в пределах поднятия Де Лонга [Гаврилов и др., 2021] проводилось в связи с регистрацией на космоснимках извержений газов с 1973 по 2008 гг. у прибрежного мелководья к востоку от острова Беннетта, достигавших берегов Аляски (рис. 1). Были высказаны вулканическая и газогидратная гипотезы происхождения шлейфов. Состав газов не известен до сих пор. В пользу вулканической версии Ю.П. Масуренковым с коллегами [2013] приводился целый ряд доводов.

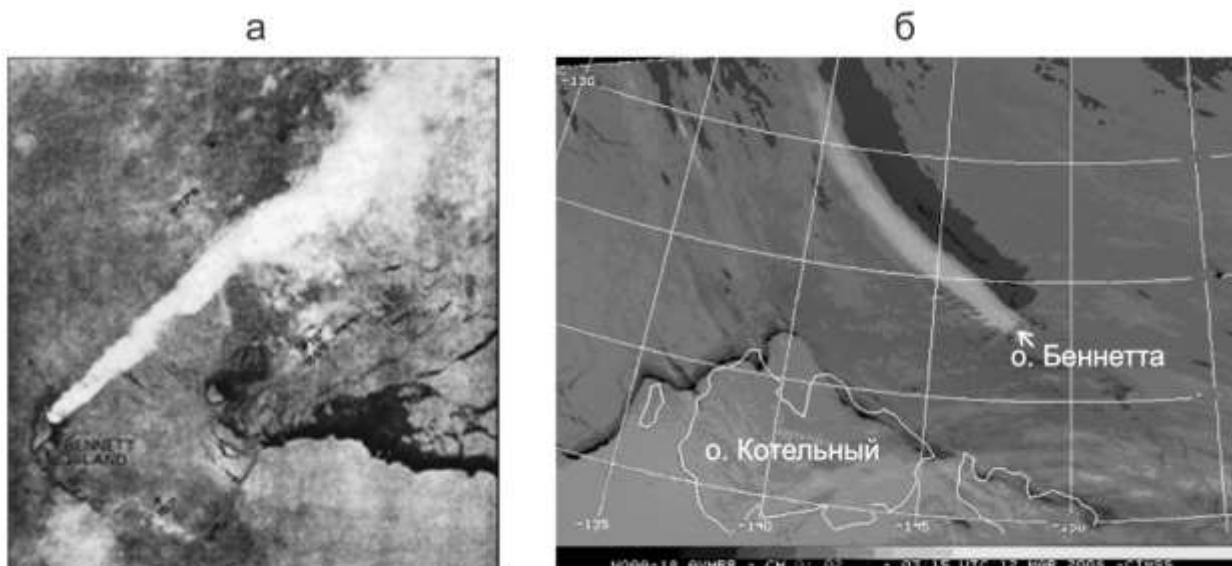
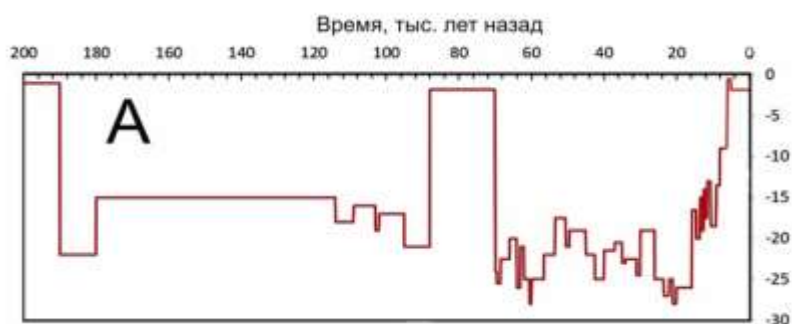


Рис. 1. Газовые шлейфы близ о Беннетта, зарегистрированные на космоснимках 19.02.1983 г. (а) и 12.03.2008 г. (б) [Масуренков и др., 2013].

Район поднятия Де Лонга характеризуется проявлением ярко выраженных эндогенных процессов. Кроме повторяемости извержений газов району свойственны высокая сейсмичность (восемь землетрясений магнитудой 4-5 с 1973 по 2007 гг.), активность геоморфологических процессов на островах [Масуренков, 2013]. Поскольку неотектоническая активность региона высока, это свидетельствует о повышенном тепловом потоке из недр. Поэтому для численного моделирования были заданы два крайних значения 60 мВт/м^2 (Котельническое поднятие и его окружение) и 75 мВт/м^2 (поднятие Де Лонга) [Davies, 2013].

Палеогеографический сценарий истории развития за последние 200 тыс. лет строился в виде кривой эволюции температуры поверхности пород (рис. 2), составленной в результате трансформации палеотемпературной кривой ст. Восток (Антарктида) в кривую побережья и шельфа Восточной Сибири. Трансформация осуществлялась с помощью палеотемпературных реконструкций в климатические экстремумы, полученных в ходе изучения четвертичной геологии приморских низменностей и Новосибирских островов.



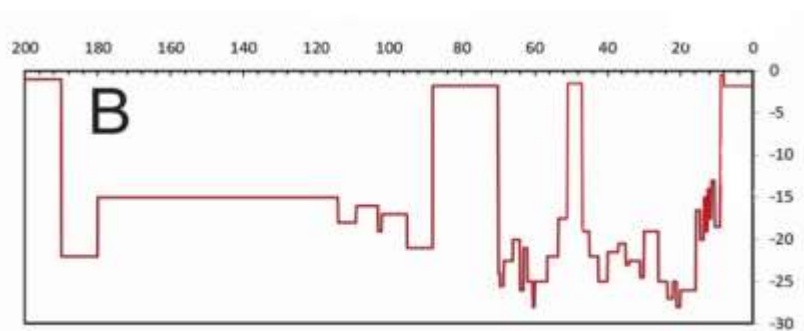
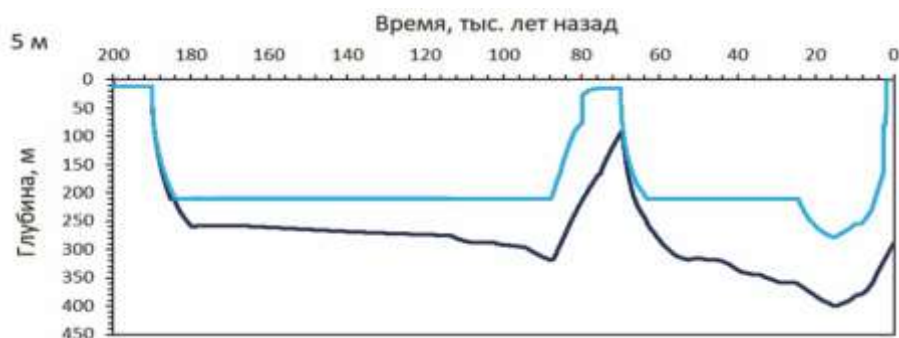


Рис. 2. Палеогеографический сценарий для поднятия Де Лонга. Палеотемпературы пород при глубинах моря: **A** - 5 м, **B** – 40 м.

Показатели водно-физических и теплофизических свойств пород были выбраны из литературных данных для соответствующих типов отложений [Гаврильев, 2013; Теплофизические..., 1984]. Для расчета теплового состояния ММП использовалась одномерная модель теплофизических процессов в донных отложениях с учетом фазовых переходов между мерзлыми и талыми породами [Malakhova, Eliseev, 2020].

По результатам численного моделирования при тепловом потоке 60 мВт/м^2 , мощность мерзлоты составила 280-290 м, а при теплотокке 75 мВт/м^2 мерзлые толщи полностью деградируют при глубинах моря 40 м около 4 тыс.л.н., при глубинах 5 м – около 2 тыс.л.н. (рис. 3). Таким образом, расчеты показывают, что на шельфе $76-77^\circ\text{с.ш.}$ могут существовать субмаринные талики. При этом не только на внешнем и среднем шельфе, затопленном 9-13 тыс. лет назад, но и на мелководьях. Полученные результаты кардинально расходятся с ранее выполненным моделированием, осуществленном без учета влияния эндогенных процессов [Романовский и др., 2006]. Таким образом полученная геокриологическая модель шельфа района о. Беннетта оказалась близкой к мерзлотной обстановке района скважины DL-1, как области островного или прерывистого распространения мерзлоты небольшой мощности на мелководьях с возможным отсутствием мерзлоты на изобатах около 40 м и более.



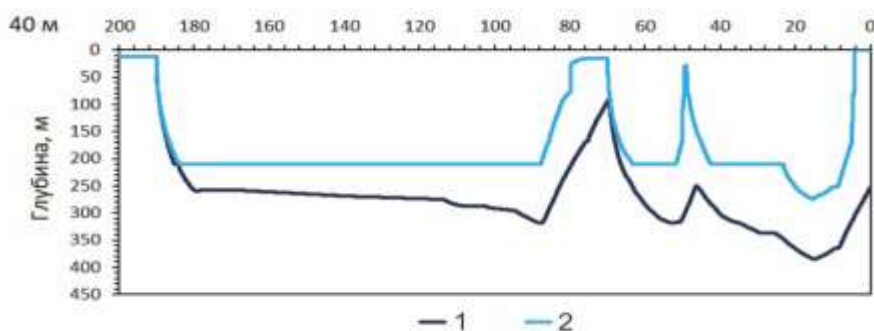


Рис. 3. Результаты численного моделирования современного распространения и мощности мерзлых пород в пределах поднятия Де Лонга при глубинах моря 5 м (верхний) и 40 м (нижний график). 1 – плотность теплового потока = 60 мВт/м², 2 – плотность теплового потока = 75 мВт/м².

Данные о существовании высокого теплового потока в северо-западной части Восточно-Сибирского моря приводятся в публикации 2022 г. [Богоявленский и др., 2022]. На участках извержений газов в пределах разломных зон в настоящее время существуют талики.

Выполненные исследования показывают, что оценочный метод – численное моделирование – может быть достаточно информативным. Для того, чтобы он стал действительно таковым, необходимым условием является задание в качестве показателей водно-физических и теплофизических свойств пород не справочных данных, а сведений, получаемых при лабораторных работах, сопровождающих стратиграфическое малоглубинное бурение. Кроме выстаивания скважин для термометрии требуется также определение солености поровой влаги по всему разрезу. Определение состояния пород основывается на сравнении температуры начала замерзания поровой влаги и измеряемых температур пород в скважине. Необходимо, чтобы исследовательский коллектив включал специалистов инженерно- и гидро-геокриологического профиля.

Литература

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.

Гаврилов А.В., Малахова В.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А. Криолитозона внешнего шельфа Восточно-Сибирского шельфа и ее связь с вулканогенными явлениями // XII Межд. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование» MARESEDU-2021. Труды конф., Т. IV. 53-57 10.2021. г. М., 2021, с. 51-54.

Гаврильев Р.Г. Каталог теплофизических свойств горных пород Северо-Востока России. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 2013. 172 с.

Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Петрова В.В. и др. Современная активность эндогенных процессов у острова Беннетта (архипелаг Де Лонга, Арктика) – М. ИФЗ РАН, 2013. - 160 с.

Петров О.В., Никишин А.М., Петров Е.И. и др. Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого океана // Доклады РАН, Науки о Земле, т. 512, № 2, 2023, DOI: 10.31857/S268673972360100X, EDN: MNCKHL

Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В., Типенко Г.С., Хуббертен Х.В. Многолетняя динамика толщ мерзлых пород и зоны стабильности газовых гидратов в рифтовых структурах Арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 2). Результаты численного моделирования // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 29-38.

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

Теплофизические свойства горных пород. Под ред. Э.Д. Ершова. М. Изд-во МГУ, 1984. 203 с.

Davies J. H. (2013), Global map of solid Earth surface heat flow // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, doi: 10.1002/ggge.20271.

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

ВЛИЯНИЕ СЖИГАНИЯ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ

Е.И. Пижанкова¹, И.Н. Пижанков²

¹ - МГУ, геологический факультет, ² - ФГБУ «Россельхозземмониторинг»

Территория исследований, проводившихся в 2021 г., заключавшихся в изучении геолого-экологических условий и нефтяного загрязнения правобережья широтного отрезка р. Обь, относилась к Саянскому месторождению. Аналогичные работы 2023 г. осуществлялись на левобережье р. Обь преимущественно в пределах Мамонтовского, Южно-Балыкского и Западно-Угутского месторождений (на междуречье р. Бол. Салым и Бол. Юган). Территория правобережья относится к северотаежной зоне, где преобладают болота и заозеренность, а левобережья – к среднетаежной зоне с хвойными лесами, а также лиственными (осиново-березовыми) породами подроста на вырубках и гарях и смешанными лесами. Значительная часть территории занята олиготрофными верховыми сфагновыми болотами. К долинам рек приурочены низинные болота и смешанные леса с темнохвойными породами. Четвертичные отложения представлены аллювием пойм и террас, озерно-аллювиальными отложениями второй (каргинский и сартанский горизонты) и третьей (ермаковский горизонт) надпойменной террасы, а также тазовско-казанцевским горизонтом четвертой надпойменной террасы.

Цель исследований включала анализ техногенной нагрузки и ее воздействие на геолого-геологические условия территории с детализацией влияния сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ). Для характеристики природной среды помимо полевых исследований, включавших изучение геологических, геоморфологических и геоботанических условий исследуемой территории, производился анализ топографических карт, литературных данных, разновременных и разномасштабных космических снимков. Дешифрирование разновременных многозональных космических снимков с разрешением на местности от 30-15 м для Landsat-5, -7, -8, -9, до 1,65 м для GeoEye-1, позволило помимо исследования ландшафтов произвести детальную характеристику техногенной нагрузки и как следствие – нарушений природной среды. Синтез каналов 6-4-3 (тепловой, ближний инфракрасный и красный) спутника Landsat-5 за 1985, 1998 гг. позволил выявить факелы сжигания попутного газа. На космоснимках Landsat-5, -7, -8, -9 за 1998-2000, 2009, 2024 гг. с синтезом 6-4-3 и 6-10-11 (инфракрасного и тепловых) каналов были зафиксированы действующие в эти годы факельные установки. Использование космоснимков субметрового пространственного разрешения GeoEye-1 за последние годы (2010-2023), образующих глобальное покрытие Esri WorldImagery [<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>] дало возможность исследовать современное состояние факельных площадок.

Анализ ночных космоснимков 2012 г. (спутник Suomi NPP, управляемый NASA) показал значительное количество газовых факелов на разрабатываемых нефтяных месторождениях севера Европейской части России, и особенно большое - в Западной Сибири. На схеме района исследований Нефтеюганского и Сургутского р-нов помимо 32 обследованных участков нефтезагрязнения, зафиксированы 20 действующих факелов сжигания ПНГ и 10 мест расположения бывших факелов. Аналогичная, но более крупномасштабная ситуация (по количеству факелов и объему сжигания газа) характерна для Самотлорского месторождения.

Попутный нефтяной газ - смесь газообразных углеводородов, растворенных в нефти, которые выделяются в процессе ее добычи и подготовки. В состав ПНГ входят кроме метана пропан, бутан, этан, изобутан, пентан, изопентан, а также азот, двуокись углерода и другие компоненты в меньшем количестве. Сжигание ПНГ является серьезным воздействием на состояние окружающей природной среды. При этом в наибольшей степени загрязняется атмосферный воздух. ПНГ может содержать элементы, которые присутствуют как в самой нефти, так и в пластовых водах, контактирующих с нефтью. По данным Соловьянова А.А. [2015] продукты сгорания ПНГ могут достигать высоты не менее 600 м, распространяясь в дальнейшем на большую территорию. Сульфаты мигрируют в атмосфере в течение приблизительно 40 дней после выброса. При этом около 40% их выпадает вблизи факела, около 30% - на расстоянии нескольких сотен километров от источника и оставшиеся 20% - на расстоянии от тысяч до десятков тысяч километров. Значимые концентрации углеводородов, аммиака и монооксида углерода фиксируются на расстоянии до 15 км от факела, сероводорода - до 10 км, оксидов азота - до 3 км. В наибольшей степени влияние загрязняющих веществ ощущается вблизи горящих факелов. Кроме этого в результате выбросов горящих фракций нефти, присутствующей в ПНГ, систематически возникают лесные пожары, а прифакельная территория загрязняется углеводородами, сульфатами, нитратами, сажей, полиароматическими углеводородами, 3,3-бензпиреном, диоксинами и тяжелыми металлами [Соловьянов, 2015]. Кроме этого происходит изменение теплового режима прилегающих территорий, дигрессия лесных насаждений [Крючков, 2000].

Анализ видов техногенного воздействия нефтегазодобычи на природную среду показал высокую долю воздействия факелов сжигания попутного нефтяного газа в конце XX века. Основные техногенные объекты (кроме населенных пунктов) – это кустовые площадки со шламовыми амбарами; промплощадки с пунктами сбора и подготовки нефти, компрессорными, дожимными и нефтеперекачивающими станциями, нефтехранилищами; нефтепроводы; факельные площадки; карьеры по добыче строительных материалов (песка и галечников); автодороги. Их воздействие на природные условия проявляется через изъятие земельных угодий и уничтожение растительного покрова при создании насыпей, траншей, карьеров, коридоров линейных объектов;

загрязнение атмосферы, почв, растительного покрова, подземных вод при утечках нефти, аварийных сбросах, выбросах и сжигании попутного газа; тепловое воздействие и подтопление.

Объем сжигания газа в факелах зависит от длительности и периодичности действия, размеров труб, состава газа. Высота труб преимущественно составляет от 3 до 30 м, диаметр от 150 до 700 мм. Различные по мощности факелы охватывают воздействием на природную среду от 10-15 метров по радиусу (малые факелы) до 250 м и более (крупные факелы), создавая своеобразный микроклимат. Тепловое выделение в радиусе 50 м от факела превышает фоновую температуру воздуха зимой на 15-30°C, летом на 35-50°, максимум - 70° (табл. 1). Усиливается конвективное передвижение воздуха над прилегающей территорией, что вызывает в два раза более частое образование кучевых облаков, в 1,4 раза выпадения дождей, увеличивается также частота гроз, возрастает частота формирования туманов, усугубляющих вредное действие дымовых и газовых примесей [Гашев и др., 1994; Залесов и др., 2002]. По данным [Книжников, Ильин, 2017] территория, на которую негативно влияет факельная установка, условно разделяется на несколько зон: 1) интенсивная нагрузка 30-200 м.; 2) умеренная нагрузка 200-1000 м.; 3) низкая нагрузка 1000-4000 м; 4) остаточное воздействие 4000-10000 м и более. По данным [Алтунина и др., 2014], температура поверхности изменяется от 20 до 48°C, радиус прямого термического повреждения растительности для факелов малой мощности достигает 50 м, большой мощности - 200 м. Последствия угнетения растительности только за счет теплового излучения наблюдаются на расстоянии 4 км и более.

На лесные экосистемы газовые факелы воздействуют посредством выбросов и теплового излучения. Выбросы влияют контактно на растения и опосредованно через почву. Накопление загрязняющих веществ снижает плодородие почвы и формируется ее токсикоз. В первую очередь в этих условиях гибнут деревья, занимающие верхнюю высоту полога. Наиболее подвержены отрицательному влиянию факелов хвойные породы, такие как ель и пихта, мелкий подрост кедра не достигает средней высоты (гибнет), а двухъярусный древостой обеспечивает защиту подросту от влияния факела [Залесов и др., 2002]. Вблизи факельных труб часто отсутствует всякая растительность. Почвы в зоне влияния факелов замазучиваются, формируются геохимические аномалии, а вблизи труб происходит полное выжигание органического вещества (табл. 1). Влияние газовых факелов на растительный покров фиксируется также по детальным космоснимкам (рис. 1).

Таблица 1

Характеристика зон воздействия газового факела на Аганском месторождении (высота трубы 15 м, размер языка пламени 5-7 м)

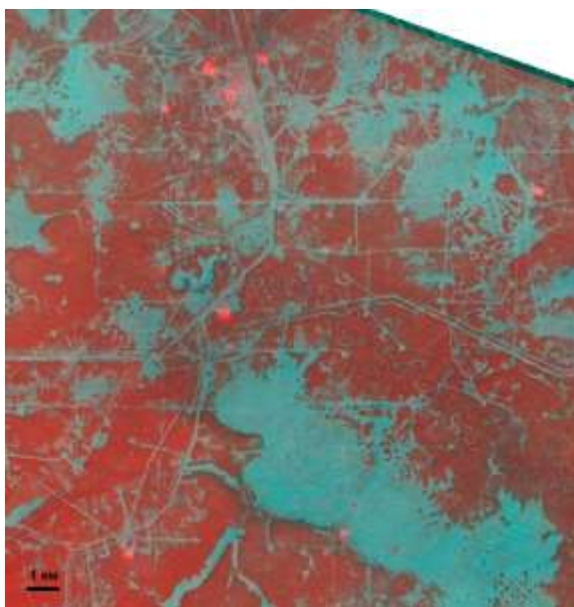
[по Гашеву и др., 1994]

Показатель	Контроль (за пределами зон воздействия)	Зоны				
		I	II	III	IV	V
Расстояние от факела, м	>500	>150	110-150	80-110	50-80	0-50
Средняя температура воздуха в приземном слое, °C	летом 20,0 зимой -21,5	22,7	28,0	31,8	34,8	61,0
Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова, %	100	100	90	70	10	0
Характеристика зон воздействия факела		Температура воздуха в приземном слое ближе к факелу полосы этой зоны шириной 40-50 м превышает фоновую на 3-4°. Инфракрасное излучение ощущается кожей лица на расстоянии >0,5 км. Растительный покров представлен коренными ассоциациями с живым напочвенным покровом	Температура выше нормы на 7-8°. Органолептически определяется наличие в воздухе сернистого ангидрида. Это зона горельников, образовавшаяся в результате периодических возникающих пожаров от выбросов пламени факела	Температура выше контрольной на 8-12°. Живой напочвенный покров имеет вторичное происхождение. В результате периодического выгорания дерновина не образуется. Концентрация нефтепродуктов в верхнем слое почвы составляет 1-5%	Температура на 12-16° превышает таковую в контроле. Дернины нет. Концентрация нефтепродуктов в почве достигает 10%	Температура выше контроля зимой на 15-30°, летом на 35-50°, максимум - 70°. Лесная подстилка и гумусовый горизонт выжжены. Грунт прокален и местами спекся в корку толщиной до 5 см. В микропониженных местах стоят лужи нефти. Суммарный уровень γ- и β-излучения на 43% выше фонового

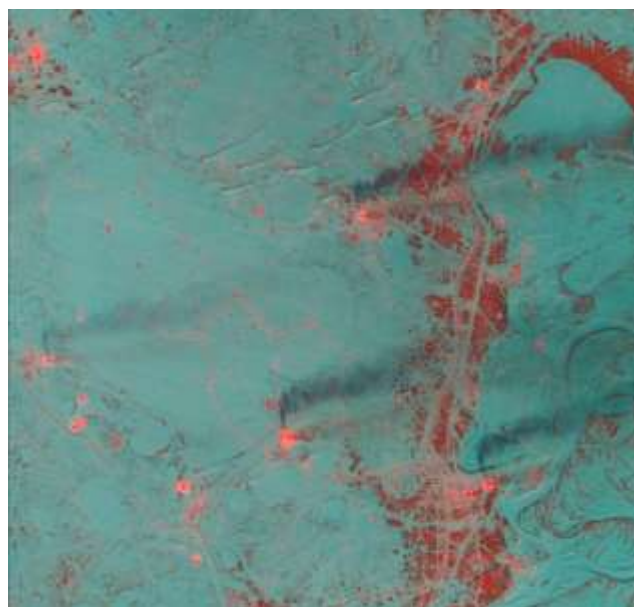


Рис. 1. Воздействие факела сжигания ПНГ на природную среду. Факельная площадка ДНС Средне-Угутского месторождения (левобережье р. Бол. Юган). Космоснимок GeoEye-1 [https://bestmaps.ru/map/esri/sat/18/60.46588/793.88609].

По космоснимкам Landsat-5 (март 1985 г.) на Мамонтовском и Самотлорском месторождениях, при синтезе каналов 6-4-3 (рис. 2) были выявлены факелы сжигания попутного газа, детальная характеристика мест расположения которых осуществлена по космоснимкам субметрового пространственного разрешения.



а



б

Рис. 2. Изображение факелов сжигания попутного газа Мамонтовского (а) и Самотлорского (б) месторождений на космоснимках Landsat-5 (март 1985 г.), синтез каналов 6-4-3.

В 2009 г. в России было принято Постановление Правительства РФ «О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках». В 2012 году вступило в силу постановление, что 95% ПНГ должно быть утилизировано с пользой, и только 5% можно сжигать. Основными методами утилизации ПНГ помимо его сжигания на месте добычи, преобладавшим на первых этапах разработки нефтяных месторождений, является закачка в пласт, использование в качестве топлива для выработки электроэнергии, а также фракционная переработка с очисткой от механических примесей, двуокиси углерода и сероводорода. Однако до сих пор показатель рационального использования ПНГ в России не достигает этой цифры [Рациональное...2023]. В настоящее время по данным [Рядинская, Череповицына, 2022] объемы сжигания ПНГ на факелах возрастают. Это связано с ростом нефтедобычи в России и с тем, что нефтедобывающие компании не успевают развивать инфраструктуру для утилизации газа, что в частности связано с отдалённостью месторождений от газоперерабатывающих заводов.

Анализ разновременных космических снимков выявил, во-первых, увеличение количества действующих газовых факелов в связи с вовлечением в разработку новых нефтяных месторождений (рис. 3), во-вторых, состояние прежде действовавших факельных площадок и результаты воздействия газовых факелов на грунты основания.



Рис. 3. Изображение факела Западно-Угутского месторождения на космоснимке Landsat-9, 05.04.2024 г. (синтез 6-10-11) и факельной площадки (с площадью воздействия) на мозаике Esri WorldImagery [<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/15/60.358/793.6986>].

По космоснимкам фиксируется, что отсыпка грунтов происходит преимущественно в пределах заболоченных и оторфованных территорий, в связи с чем в результате мощного и длительного теплового воздействия происходит выжигание органического вещества почв и грунтов и просадка поверхности, что приводит к необходимости создания новых факельных площадок. Кроме этого возможны термокарстовые просадки в местах существования мерзлых торфяников островного распространения. Их наличие было зафиксировано при полевых работах 2023 г. На существовавших прежде факельных площадках происходит образование озер округлой формы (рис. 4, 5).

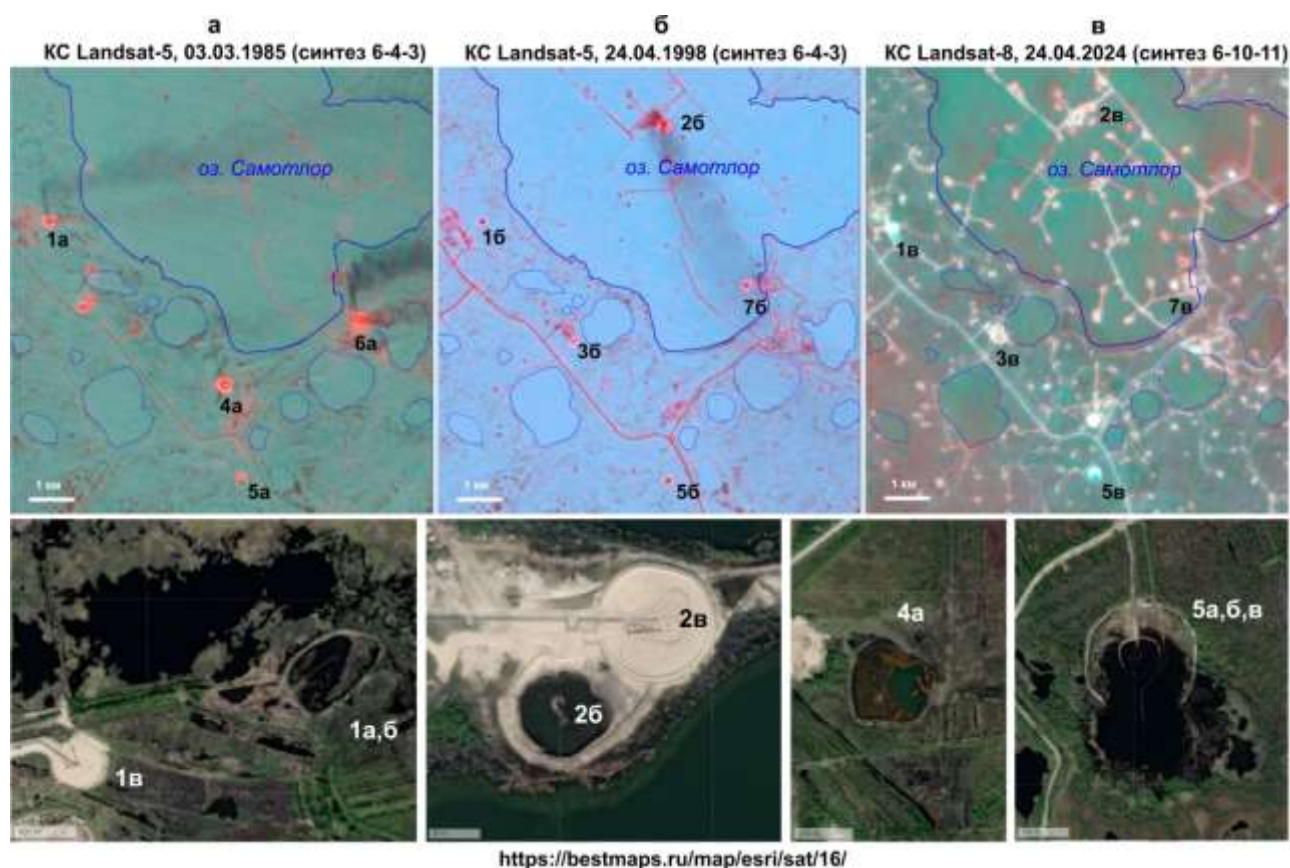
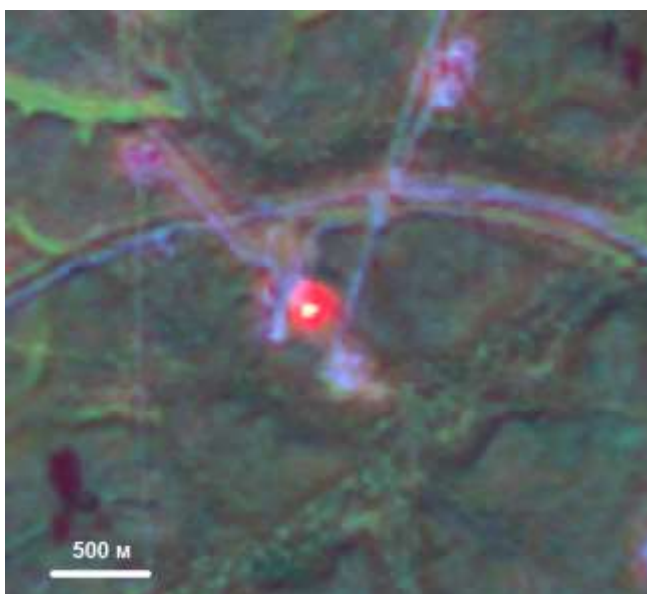


Рис. 4. Изображение факелов сжигания попутного нефтяного газа Самотлорского месторождения на космических снимках: а - Landsat-5 (03.03.1985), б - Landsat-5 (24.04.1998), в - Landsat-8 (24.04.2024) и факельных площадок на космоснимках GeoEye-1 (<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/16/>). 1а...7в – обозначение факелов и факельных площадок на разновременных и разномасштабных космических снимках.

В том случае, если площадка была создана на минеральных грунтах, срок ее действия весьма длительный и сжигание попутного газа происходит до настоящего времени (рис. 6). Однако на исследуемой территории преобладают вновь созданные факельные площадки и фиксируются обводненные территории на месте прежних факелов.



Рис. 5. Факелы сжигания ПНГ Самотлорского месторождения близ г. Нижневартовска с наблюдающимися просадками и обводнением поверхности по периферии насыпей факельных площадок, а также высохшим древостоем.



а



б

Рис. 6. Изображение факела сжигания попутного газа Мало-Балыкского месторождения на левом берегу р. Айяун на космоснимке а) Landsat-5, 18.09.1985 (синтез каналов 6-4-3), и б) факельной площадки на современном детальном космоснимке глобального покрытия Esri WorldImagery (<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/16/60.5012/792.5495>) (2020)

Выводы

1. Изменение природных условий исследуемой территории в Нефтеюганском, Сургутском и Нижневартовском районах связано с техногенной нагрузкой, в частности добычей нефти и сжиганием попутного нефтяного газа.

2. Наибольшее воздействие сжигание попутного нефтяного газа оказывает на состояние атмосферы, как за счет выброса загрязняющих веществ, так и теплового воздействия, превышающего фоновые температуры воздуха на 15-50°C, что приводит к изменению микроклимата прилегающих территорий.

3. Радиус максимального воздействия газовых факелов на растительный покров с его деградацией и формированием геохимических аномалий достигает 200-250 м.

4. Тепловое воздействие факелов сжигания ПНГ на грунты основания при расположении факельных площадок в пределах заболоченных и оторфованных территорий приводит к уничтожению органики в грунтах и просадке поверхности с образованием озер.

Литература

Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Яценко И.Г., Алексеева М.Н. Загрязнение окружающей среды при сжигании попутного нефтяного газа на территории нефтедобывающих предприятий // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Vol. 22. С. 217–222.

Гашев С. Н., Казанцева М. Н., Соромотин А. В., Рыбин А. В. Влияние факелов на биогеоценозы Среднего Приобья // Бюллетень МОИП. 1994. Т. 99, вып. 1. С. 3-7.

Залесов С.В., Кряжевских Н.А., Крупинин Н.Я. и др. Деграция и демутация лесных экосистем в условиях нефтегазодобычи. Урал.гос.лесотехн.университет. Екатеринбург, 2002. Вып. 1, 436 с.

Книжников А. Ю., Ильин А. М. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России — 2017. М.: WWF России, 2017. — 34 с.

Крючков К.В. Влияние факелов по сжиганию попутного газа на лесные насаждения. Автореф. дисс...канд.с.х.наук. Екатеринбург, 2000, 21 с.

Рациональное использование попутного нефтяного газа: как обстоят дела в 2023 году?// Нефтегазовая промышленность. Тренды. 6 июня 2023.

<https://nprom.online/trends/ratseeonalnoye-eespolzovaneeye-poputnogo-nyeftyanogo-gaza/>

Рядинская А. П., Череповицына А. А. Утилизация попутного нефтяного газа в России: методы и перспективы производства продуктов газохимии // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. № 2. С. 19–34. doi:10.37614/2220-802X.2.2022.76.002

Соловьянов А.А. Проблемы использования попутного нефтяного газа в России // НефтеГазоХимия, №1, 2015, с.12-16.

МОРОЗОБОЙНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ГРУНТОВ НА СЕВЕРЕ ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А. Ю. Деревягин

Введение

Морозобойное растрескивание грунтов один из наиболее распространенных физико-геологических процессов в криолитозоне. Физическая сущность образования морозобойных трещин рассматривается в работах Б. Н. Достовалова (1952), А. Н. Лакенбрука (Lachenbruch, 1960), С. Е. Гречищева (1980), Н. Н. Романовского (1977) и др. При промерзании сезонно талого слоя (СТС) в начале зимы грунты увеличивают свой объем за счет перехода воды в лед. Дальнейшее понижение температуры ведет к уменьшению объема, вследствие температурного сокращения твердых тел при охлаждении. Когда температурные напряжения превышают временное сопротивление на разрыв, происходит образование трещин. Последующее заполнение трещин весной талой водой или грунтом и замерзание приводит к образованию жильных льдов или ледогрунтовых и грунтовых жил.



Рис. 1. Полигональная тундра. Остров Самойловский, дельта Лены. На заднем плане научная станция «Арктический центр ИНГГ СО РАН о. Самойловский». Фото М. Н. Григорьева.

Результатом многолетнего морозобойного трещинообразования является формирование полигональных ландшафтов (рис. 1) и сети полигонально-жильных структур (ПЖС): изначально-грунтовых жил (ИГЖ), первично-песчаных жил (ППЖ), ледогрунтовых жил, песчано-ледяных жил (ПЛЖ), повторно-жильных льдов (ПЖЛ) (Романовский, 1977).

Полигонально-жильные структуры Лаптевоморского региона

Морозобойное растрескивание определяет ландшафтную и криогенную (мерзлотную) специфику геологической среды и является как фактором денудации, так и фактором аккумуляции, и широко распространено на Севере России как в пространстве, так и во времени.

На поверхности эти структуры выражены в виде полигонально-жильного рельефа: полигонально-валикового в стадии роста жил, полигонально-бугристого – в стадии разрушения жил, остаточного-полигонального – после полного вытаявания жил.

В разрезах – многолетнее морозобойное растрескивание формирует мощные клиновидные структуры (рис. 2). Вертикальная мощность повторно-жильных льдов (ПЖЛ) на севере Якутии достигает 50 и более метров (Тумской, 2023).



Рис. 2. Повторно-жильный (полигонально-жильный) лед в береговом уступе высотой 20 м участка остров Муостах

Частота растрескивания, расположение и глубина трещин зависит от величины температурных градиентов, определяемых климатическими условиями, составом и физико-механическими свойствами пород. Велика роль снежного покрова, влияющая на изменения температуры грунта при промерзании. Чем больше мощность снежного покрова, тем меньше вероятность возникновения трещин.

Исследования морозобойного растрескивания и формирования полигонально-жильных структур на севере Якутии проводились в 1998-2016 г. г. (рис. 3: в дельте Лены (1), Новосибирских островах (5, 6, 7, 8), побережье пролива Дмитрия Лаптева (Ойгосский Яр, (9)), на Оленек-Анабарском междуречье (2). Морозобойное растрескивание ежегодно происходит на

Приморских низменностях Северной Якутии на всех элементах рельефа (от высоких террас, до низкой поймы) и сопровождается формированием полигонального рельефа и ростом ПЖЛ. Размер полигонов от 10-15 до 20-25 метров. Форма полигонов – тетрагональная, пентагональная, гексагональная.

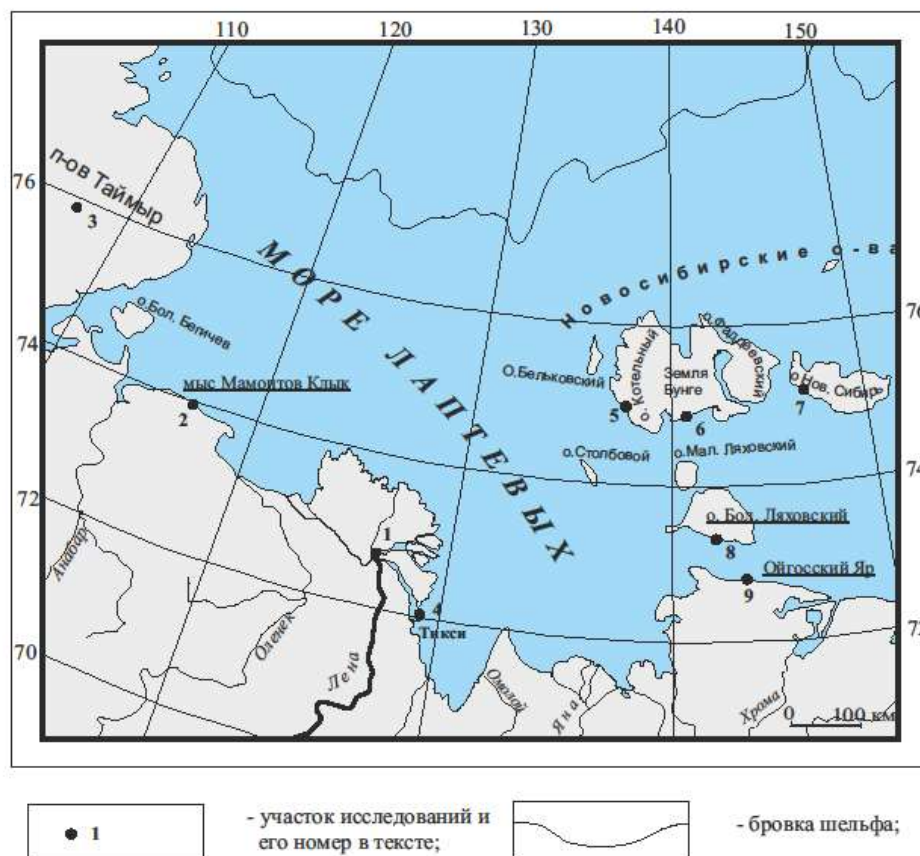


Рис. 3. Карта фактического материала.

Морозобойное растрескивание на побережье моря Лаптевых происходило на протяжении всего среднего и верхнего неоплейстоцена, в голоцене и продолжается в настоящее время. За это время было сформировано несколько ярусов ледовых комплексов (Тумской, 2023). Изученные разрезy на севере Якутии свидетельствуют, что формирование морозобойных трещин шло, начиная как минимум со среднего неоплейстоцена (юкагирская свита), в верхнем неоплейстоцене, в голоцене и в настоящее время. В разные периоды заполнение трещин было различным: грунты, ледогрунтовые и песчано-ледяные смеси, конжеляционный лед, смесь конжеляционного и сублимационного льда.

Наиболее полные разрезy сохранились в восточной части региона (о-в Бол. Ляховский (8), Ойгосский Яр (9)). Накопление ЛК началось здесь около 250 тыс. лет назад (юкагирская свита) и закончилось 27-32 тыс. лет назад (ойгосская свита). Отложения последнего ледникового максимума (сартанские отложения) здесь имеют вложенный характер и весьма ограниченное распространение по долинам рек (Тумской, 2023).

Напротив, в западной части региона (мыс Мамонтовый Клык (2), п-ов Таймыр (3)) разрезы последнего ледникового максимума 27–12 тыс. лет назад хорошо датированы и венчают толщу верхнего неоплейстоцена (ойгосская (едомная) свита). В центральной части (дельта Лены (4)) наблюдаются наиболее полные разрезы позднеплейстоценового ЛК, мощность которого достигает здесь 50-60 м.

Датированные разрезы и прямые датировки повторно-жильных льдов, показали, что в большинстве случаев ПЖС верхних горизонтов наследуют полигональную структуру более древних слоев. В основании некоторых изученных разрезов побережья моря Лаптевых вскрываются системы песчано-ледяных жил, переходящих выше по разрезу в мощные повторно-жильные льды позднеплейстоценового ледового (едомного) комплекса. Такие контакты отмечены на Лено-Анабарском междуречье (участок Мамонтовый Клык), в дельте Лены (о-в Курунгнах), на Ойгосском Яру, на острове Большой Ляховский, на острове Котельный (р. Хомурганнах).



Рис. 4. Современный голоценовый росток повторно-жильного льда. Участок Ойгосский Яр

Растрескивание и формирование полигонально-жильных структур продолжается и в настоящее время, что подтверждается визуальными наблюдениями, и данными тритиевого анализа (Dereviagin., et al. 2002). На всех изученных участках наблюдаются современные ростки повторно-жильных льдов (рис.4), а на Земле Бунге современные ледогрунтовые жилы.

Мониторинг морозобойного растрескивания в дельте Лены

Несмотря на очень широкое распространение изучение особенностей морозобойных трещин (время трещинообразования, глубины и ширины раскрытия, особенности заполнения) сопряжено со значительными трудностями. Зимой трещины (и полигоны) занесены снегом, коротким северным летом трещины закрыты. К сожалению, отсутствует надежный способ измерения глубины трещин. Поэтому данные приводимые в литературе трудно сравнимы и содержат в основном ширину трещин поверху, размер полигонов в плане и время раскрытия трещин. Наиболее детальный многолетний мониторинг морозобойного трещинообразования проводился Дж. Р. Маккеем (MacKay, 1974) на Аляске, Е.Е. Подборным (1978) в Усть-Порту (низовье Енисея), А. В. Паталеевым (1966) (район г. Хабаровск) и некоторыми другими исследователями.

В 2002-2007 г.г. на острове Самойловский ($72^{\circ}22'$ с.ш., $126^{\circ}30'$ в. д.) в дельте Лены был организована площадка для круглогодичного наблюдения за морозобойным растрескиванием. Размеры острова Самойловский составляют примерно 2,5 на 3 км. Поверхность острова представлена преимущественно первой надпойменной террасой (абс. высота 8 – 12 м), а также заливаемыми пойменными уровнями (абс. высота 2 – 5 м) с полигонально-валиковым рельефом, множеством термокарстовых, старичных и полигональных озер. Состав грунтов – супесчано-песчаный с большим количеством повторно-жильных льдов и торфяных слоев. Мощность многолетней мерзлоты в районе о. Самойловского – около 500 м. Толщина сезонноталого слоя – 0,3 – 0,7 м. Среднегодовые температуры грунтов около -10°C . Остров относится к зоне тундры. С 1998 года на острове ведутся круглогодичные метеорологические наблюдения. Самые холодные месяцы январь и февраль со среднемесячными температурами соответственно -30.1°C и -33.1°C . Самые теплые месяцы июль и август со среднемесячными температурами соответственно $+10.1^{\circ}\text{C}$ и $+8.5^{\circ}\text{C}$. Суммарные годовые осадки за период наблюдений составили около 190 мм из них на снег приходится менее 30%. Продолжительность периода со снежным покровом, а также его мощность сильно изменяется из года в год. В 2011 году длительность составила 197 дней, а в 2006 году соответственно 254 дня. Средние значения высоты снежного покрова составляют около 17 см на валиках и около 46 см в центре полигона.

Для мониторинга был выбран валиковый полигон, расположенный на первой надпойменной террасе Оленекской протоки. Полигон имеет гексагональную форму, и диаметр 20,6 м. Ширина валиков около 20-25 см. Превышение валиков над центром полигона 0,5 м. Центральная часть более влажная, но без открытой воды. Мощность СТС в центре полигона 0,5-0,6 м на валиках около 0,2-0,25 м. В полигональных канавах прослеживаются закрытые морозобойные трещины.

Образование трещин фиксировалось разрывом медного провода, закрепленного на вбитых в мерзлоту штангах по бортам полигона. Образование трещин происходило между 16 ноября и 06 февраля. Наибольшее число трещин произошло в декабре (5 трещин). В ноябре – 3 трещины, в январе 1 трещина и в феврале 2 трещины.

Максимальная ширина раскрытия трещин была в середине зимы и составляла 1-1,5 см. Измеренная глубина трещин с помощью стальной мерной ленты варьировала от 1,5 до 3 м. Образование трещин на сторонах полигона происходило не каждую зиму.

Заключение

Морозобойное растрескивание происходило на Приморских низменностях Северной Якутии на протяжении среднего и верхнего неоплейстоцена и голоцена. Растрескивание сопровождалось формированием полигонального рельефа и ростом нескольких ярусов мощных повторно-жильных льдов. Установленная мощность жильных льдов в районе составляет 50 и более метров (п-ов Быковский, о-в Бол. Ляховский).

Формирование ПЖС происходило не только в холодные периоды неоплейстоцена – криохроны, но и в относительно теплые периоды – термохроны верхнего неоплейстоцена (крест-юряхская свита) и в голоцене.

В настоящее время растрескивание происходит на всех элементах рельефа (от высоких террас, до низкой поймы). Размер полигонов от 10-15 до 20-25 метров. Форма полигонов – тетрагональная, пентагональная, гексагональная. Глубина современных трещин от 1-1,5 м до 2-3 м. Не все полигоны трескаются каждый год. Время растрескивания: с конца ноября до февраля.

Полигонально-жильные структуры имеют большое значение для инженерно-геологической оценки территории, правильного понимания стратиграфии четвертичных отложений. Повторно-жильные льды – основа для возникновения термокарста, термоэрозии, термоабразии. Учет глубин морозобойного растрескивания необходим при проектировании дорог, линий связи, фундаментов и т. д.

Широкое внедрение в последние годы в практику инженерно-геологических исследований датирования четвертичных отложений и повторно-жильных льдов имеет большое значение для палеомерзлотных, палеоклиматических реконструкций, установления периодичности образования и деградации многолетнемерзлых пород.

Литература

Гречищев С. Е., Чистотин Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра. 1980. 383 с.

Достовалов Б. Н. О физических условиях морозобойных трещин и развитии трещинных льдов в рыхлых породах. В сб. «Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике», вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1952.

Паталеев А. В. Результаты наблюдений за развитием морозобойных трещин при сезонном промерзании грунтов в районе Хабаровска. // Устойчивость железнодорожных сооружений в условиях воздействия мерзлотных явлений. 1966, вып. 57, с. 21-27.

Подборный Е. Е. Время и интенсивность образования морозобойных трещин // Проблемы криолитологии. Вып. VII. М.: Изд-во Моск. ун-та 1978. С 132-140.

Романовский Н. Н. Формирование полигонально-жильных структур. Изд-во Наука Сибирское отд. Новосибирск, 1977, 215 с.

Тумской В. Е. Криостратиграфия и история геологического развития четвертичных отложений Арктической Якутии// Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, Якутск, 2023., 47 с.

Dereviagin A.Yu., Chizhov A.B., Meyer H., Hubberten H.-W., Simonov E. F. New data on the isotopic composition and evolution of modern ice wedges in the Laptev Sea region // Polarforschung, 2002, №70, p. 27-35.

Lachenbruch A. N. Thermal Contraction Cracks and Ice Wedges in Permafrost. – Geol. Surv. Press. Papers, 1960, N 400-B.

Mackay J. R. Ice-wedge cracks, Garry Island, Northwest Territories//Canadian Journal of Earth Sciences. 1974. Vol. 11. N 10. P. 1366-1383.