

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
2024

Содержание:

1. К вопросу определения температурной зависимости константы скорости реакции растворения гипса в воде А.Л. Лебедев, И. В. Авилина	2
2. Применение пероксида кальция в комплексной очистке фильтрата полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) М.Л. Кулешова, Т.Г. Шимко, О.Ю. Дроздова	5
3. Фильтрационные свойства песков, закрепленных инъекционным раствором эпоксидного состава для создания противofильтрационной завесы от солевых шламов М.А. Царев, А.П. Пензев, Т.Г. Шимко, Е.Н. Самарин, А.Б. Ермолинский, М.С. Чернов	14
4. Комментарии к подтоплению сооружений в условиях инверсной взаимосвязи водоносных горизонтов, задачам проектирования и гидрогеологических изысканий (на примере Рубцовской набережной Яузы) М. В. Лехов	30
5. Голоценовые повторно-жильные льды в засоленных морских отложениях побережий арктического шельфа (по космическим данным) А.В. Гаврилов, Е.И. Пижанкова	35
6. Морфоструктурный анализ распространения и динамики термокарстовых озер Яно-Индибирской низменности Е.И. Пижанкова, А.В. Гаврилов	41
7. Повторно-жильные льды на приморской низменности Анабаро-Оленекского междуречья А. Ю. Деревягин	47

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ РЕАКЦИИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСА В ВОДЕ

А. Л. Лебедев, И. В. Авилина

Кинетическое уравнение представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее зависимость скорости реакции от концентраций, влияющих на нее веществ, которое включает коэффициент пропорциональности, называемый константой скорости реакции (k) (Мэйтис, 1984). Большая часть исследований кинетики растворения гипса в воде основывается на основном законе физического растворения, сформулированным А. Н. Щукаревым в 1896 г. (т.е. плотность потока вещества с поверхности растворения пропорциональна концентрационному недонасыщению раствора). В этих работах использовались уравнения кинетики гетерогенных химических реакций растворения на поверхности гипса (R_s) в виде:

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

где k_e , k – константы скорости реакции растворения ($k_e = k/C_m^r$); C_m , C – концентрация ионов Ca^{2+} соответственно равновесия и на момент времени t ; V – объем раствора; S' – площадь удельной поверхности; r – формальный порядок реакции.

Большая часть исследований проведена при 20-25 °С и P 0.1 МПа. В этих работах природный и искусственный гипс растворяли в воде в виде суспензии, гранул, отдельных монокристаллов, плоской гладкой и шероховатой поверхности и поверхности стенок круглого канала в блоке породы. Значения величин k и r (25 °С) составляют диапазон $10^{-6} - 10^{-4}$ ммоль/(см² с), и 1 – 4.5, соответственно. При температуре от 0 до 85 °С величина энергии активации $E = 15.1 - 46$ кДж/моль. Очевидно, что при подобном разбросе значений E , k и r , отсутствует возможность достоверной схематизации скорости процесса растворения гипса, в решении научных и инженерных задач, связанных с вопросами экологии, геологии, строительства инженерных сооружений, улучшения характеристик строительных материалов и т.д. Цель данной работы – определение температурной зависимости величины k_{cp} в диапазоне значений 0 – 85 °С.

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

Материалы и методы исследований. В рассмотренных 11 работах использовались установки с динамическим, статическим и комбинированным режимами работы. Природный и искусственный гипс растворялся в воде в виде суспензии, гранул, отдельных монокристаллов,

плоской гладкой и шероховатой поверхностей и стенок канала в потоке. По результатам этих работ определяли среднее значение величины k (k_{cp}) и r . Установленная зависимость $k(r)$ при $r > 1$ указывает на определенное влияние процессов транспорта компонентного состава раствора на общую скорость процесса растворения гипса в воде. При минимальном подобном влиянии (т.е. только, в кинетической области протекания реакции) $r \rightarrow 1$.

При анализе границ макрокинетических областей использовались, прежде всего, оценки авторов проведенных исследований. Выделены две группы параметров: *I* и *II*. Группа *I* объединяет данные, полученные в кинетической и переходной областях ($E_{cp}^I = 39$ кДж/моль, $\Delta t = 0-40^\circ\text{C}$), а группа *II* – при диффузионном контроле скорости ($E_{cp}^{II} = 19.4$ кДж/моль, $\Delta t = 35-85^\circ\text{C}$).

Температурная зависимость величины k_{cp} для *I*-ой группы параметров рассчитывалась по одной точке (k_{cp}) и угловому коэффициенту ($\lg k_{cp} = \lg A_1 - B_1/T, \text{K}; B_1 = E_{cp}^I / (2.303R)$, $\Delta t = 0-40^\circ\text{C}$). Для *II*-ой группы ($\lg k = \lg A_2 - B_2/T, \text{K}$, $\Delta t = 45-85^\circ\text{C}$, рис.2) – по данным, известным только по работе (Wang et al., 2015). Эти температурные зависимости величин k_{cp} и k представляли графики прямых линий в диапазоне $t = 0-85^\circ\text{C}$, пересекающихся при 42°C .

Для системы $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}^s - \text{CaSO}_4^s - \text{H}_2\text{O}$ установлены два центра температурного перехода гипса в ангидрит (далее переход $\Gamma \leftrightarrow \text{A}$): 42 и 58°C при P 0.1 МПа (Voigt and Freyer, 2023). Эти значения определялись по экспериментальным данным растворимости и расчетам на основе принципов равновесной термодинамики. По результатам большей части исследований гипс – стабильная фаза в дистиллированной воде при $t \leq 42^\circ\text{C}$ (ангидрит – метастабилен), а если $t \geq 42^\circ\text{C}$ – стабилен ангидрит. В растворах электролитов переход $\Gamma \leftrightarrow \text{A}$ при 42°C пока предположителен (Voigt and Freyer, 2023).

Таким образом, в моделях массообмена загипсованных пород и строительных материалов с водными растворами в условиях зоны гипергенеза скорость гетерогенных химических реакций растворения на поверхности гипса характеризуется величинами $E_{cp}^I = 39$ кДж/моль и $\lg k_{cp} = 1.97 - 2036/T, \text{K}$.

Выводы. 1. По данным литературных источников установлены параметры кинетики растворения гипса в воде (уравнение 1) в диапазоне $0-42^\circ\text{C}$: $r = 1$, $\lg k_{cp} = 1.97 - 2036/T, \text{K}$, $E_{cp}^I = 39$ кДж/моль. При 25°C $k_{cp} = 1.39 \times 10^{-5}$ ммоль/(см² с).

2. Предположено, что на границе между стабильными состояниями гипса и ангидрита в воде при 42°C , повышение температуры раствора вызывает диффузионное торможение гетерогенных химических реакций растворения гипса.

Литература

- Мэйтис Л. (1984) Введение в курс химического равновесия и кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 484 с.
- Voigt W., Freyer D. (2023) Solubility of anhydrite and gypsum at temperatures below 100°C and the gypsum-anhydrite transition temperature in aqueous solutions: a re-assessment. *Front. Nucl. Eng.* 2:1208582. doi: 10.3389/fnuen.2023.1208582
- Wang, Z. N., Zhu J. B., Wu H., Chen C. G., Liu S. Z. (2015) Dissolution Kinetics of Calcium Sulfate Dihydrate. *Ciesc Journal*, 66,1001–1006.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРОКСИДА КАЛЬЦИЯ В КОМПЛЕКСНОЙ ОЧИСТКЕ ФИЛЬТРАТА ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ (ТКО)

М.Л. Кулешова, Т.Г. Шимко, О.Ю. Дроздова

Введение. Ежегодно в России образуется около 55–60 млн. тонн твердых коммунальных отходов, 90 % из них направляются на мусорные полигоны и несанкционированные свалки [10]. Площадь, занимаемая полигонами ТКО и свалками, в настоящее время составляет 4 млн. га, эта цифра вполне сопоставима с размером некоторых стран, например, Швейцарией (4,12 млн. га) или Нидерландами (4,15 млн. га) [9].

Полигоны ТКО являются источником загрязнения поверхностных и подземных вод за счет дренажных вод через его тело. Этот поток формируется за счет влажности отходов, инфильтрации атмосферных осадков, биохимических процессов деструкции (разложения) отходов. Объем фильтрационных (дренажных) вод в зависимости от влажности отходов и климатических условий обычно составляет 25-50 % от массы складироваемых отходов. В зависимости от длительности эксплуатации свалки отходы претерпевают четыре фазы разложения и характеризуются рядом показателей [2, 3, 4, 5, 6, 8, 12]:

- 1 - аэробную (1-3года) - рН -4-6, ХПК>10000, БПК₅/ХПК > 0,6; Zn, Fe, Cr > 80 мг/л
- 2 - анаэробную кислую (ацетогенез) (3-10 лет) - рН – 5-6, ХПК>6000, БПК₅/ХПК > 0,5; Zn, Fe, Cr > 70 мг/л
- 3 - активного метаногенеза (10-30 лет) - рН – 7,2-8,5, ХПК>2000, БПК₅/ХПК > 0,1; тяжелые металлы 2-5 мг/л
- 4 - стабильного метаногенеза (до 100 лет) - рН – 7,5-8, ХПК<1000, БПК₅/ХПК > 0,02; тяжелые металлы < 1 мг/л.

Фильтрат полигонов характеризуется сложным многокомпонентным составом с высокими содержаниями органических соединений, токсичных металлов и других загрязнителей. На определенных этапах эксплуатации свалки создаются условия для связывания металлов в растворимые комплексы, которые мигрируют с водными потоками в окружающую среду. Это делает его опасным источником загрязнения подземных и поверхностных вод.

Сложность и вариабельность химического состава фильтрационных вод требуют комплексной очистки фильтрата. При этом используются механические, биологические, электрофизические, физико-химические и комбинированные методы (осмос, мембранные технологии, озонирование и т.п.). Они отличаются высокой эффективностью, но

капиталозатратны и требуют квалифицированного обслуживания, что доступно только на обустроенных полигонах ТКО.

Разработка новых схем очистки фильтрата, дренирующего толщу отходов на полигонах ТКО, отличающиеся небольшими капитальными и эксплуатационными затратами, является актуальной и имеет практическое применение. В процессе комплексной очистки фильтрата возможно использование нестандартных эффективных методов воздействия. По нашему мнению, в схему обработки фильтрата в качестве первичной стадии логично включить окисление, которое позволит добиться значительного снижения органического загрязнения и разрушения органо-металлических комплексов, обеспечив возможность осаждения и иммобилизации металлов на сорбционных барьерах.

Особый интерес вызывает возможность применения для этой цели пероксида кальция (CaO_2) (ПК). Конечные продукты его превращений (CaCO_3 , O_2 , H_2O) экологически безопасны. Благодаря своей низкой растворимости в воде (1,65 г/л при 20°C) он позволяет создать невысокую концентрацию реагента - перекиси водорода (H_2O_2), которая высвобождается при его постепенном гидролизе [1]. Кроме того, ПК стабилен, прост в использовании и имеет низкую себестоимость.

Целью настоящей работы была оценка эффективности применения CaO_2 на первичной стадии очистки сточного фильтрата на полигонах ТКО.

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментов был взят фильтрат из пруда-отстойника фильтрата полигона ПТБО «Саларьево». Полигон выведен из эксплуатации, прошел рекультивацию и находится в метаногенной стадии.

Эффективность очистки фильтрата при внесении ПК оценивалась в опытах, проведенных в статическом режиме. Соотношения добавок CaO_2 к фильтрату составляло 1:100, 1:50, 1:20, 1:10. В колбы с различными навесками CaO_2 вносили определенный объем фильтрата, плотно закрывали и оставляли, при постоянном перемешивании, на 24 часа. Емкость, где соотношение ПК к фильтрату составляло 1:50 выдерживали 3 суток на обратно-поступательном встряхивателе. В исходном фильтрате и надосадочном растворе после контакта с ПК определяли содержание металлов и других показатели загрязнения.

Содержание макро- и микроэлементов в пробах определяли на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 5110 (Agilent Technologies), основных анионов – на ионном хроматографе Dionex ICS-2000 (Thermo), растворенного органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) и общего азота ($\text{N}_{\text{общ}}$) – на жидкостном анализаторе LiquiTOC-trace (Elementar).

Для расчета форм нахождения элементов использовали программу Visual MINTEQ версии 3.1 для Windows [11]. В программу вводили полученные данные по всем основным

гидрохимическим характеристикам (рН, содержание растворенных катионов, анионов, органического углерода) и содержанию микроэлементов в изучаемой пробе.

Результаты и их обсуждение

Состав исходного фильтрата. На начальном этапе исследований был охарактеризован химический состав фильтрата: металлы, макросостав (катионы, анионы), содержание органики (С_{орг.}, ХПК, БПК), азотное загрязнение (N_{общ.}), рН. В табл. 1 приведены показатели загрязнения, превышающие значения ПДК_{р/х} и СанПиН.

Таблица 1

Химический состав фильтрата на полигоне «Саларьево»

Показатель загрязнения (элемент)	Исходный фильтрат, мг/л	Сравнение с нормативами качества воды			
		ПДК р/х ¹⁾		СанПиН ²⁾	
		ПДК, мг/л	превышение над ПДК	ПДК, мг/л	превышение, над ПДК
В	5,08	0,5	10	0,5	10
V	0,04	0,001	40	0,1	-
Cr	0,27	0,07/0,02	4/13	0,5/0,05	-/5
Mn	2,49	0,01	249	0,1	25
Fe	6,41	0,1	64	0,3	21
Co	0,02	0,01	2	0,1	-
Ni	0,04	0,01	4	0,02	2
Cu	0,03	0,001	28	1	-
Zn	0,04	0,01	4	5	-
Sr	3,06	0,4	8	7	-
Mo	0,02	0,001	20	0,25	-
Na	892	120	7	200	4
K	280	50	6	-	-
Ca	224	180	1,2	-	-
Mg	91	40	2	50	1,8
SO42-	314	100	3	500	-
Cl-	1350	300	4,5	350	4
Нобщ.	229	<1	>229	2	115
Сорг.	314	5,0	63	5,0	63
ХПК, мгО2/л	914	< 30	30	15-30	30
БПК5, мгО2/л	548	3	183	2	274
БПК5 / ХПК	0,6				
рН	7,4	6-9	-	6-9	-

¹⁾ПДК_{р/х} - ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения (Приказ Госкомрыболовства России от 28. 04. 1999 № 96)

²⁾ СанПиН 2.1.5.980-00; 1.2.3685-21: 3

Все основные показатели значительно превышают значения ПДК_{р/х}. Наибольшее загрязнение отмечается по таким элементам, как В, V, Mn, Fe, Cu, Mo. Для Cr, Zn и Ni - 4-х кратное превышение над ПДК_{р/х}. Отмечается значительное превышение по органическому и азотному загрязнению - ХПК и БПК₅ превышают нормативные показатели в 30 и 180 раз,

соответственно; $N_{\text{общ}} > 200$ раз. Сравнение с нормативами СанПиН также показывает значительное превышение по В, Fe, Mn, $N_{\text{общ}}$, $C_{\text{орг}}$, ХПК, БПК₅.

Расчеты с использованием программы Visual MINTEQ показали, что в фильтрате большая часть металлов представлена их неорганическими соединениями. В органоминеральной форме содержится большая часть меди (78%) и значительные количества цинка и никеля (47 и 37%, соответственно) (табл. 2).

Таблица 2

Формы нахождения элементов в исследуемом фильтрате полигона Саларьево

Элемент	Органическая форма, %	Неорганическая форма, %	Преобладающая форма, % от общего содержания
Li	0	100	Li^+ (98)
B	0	100	H_3BO_3 (96)
V	0	100	$\text{V}(\text{OH})_2^+$ (99)
Mn	0	100	Mn^{3+} (100)
Fe	0	100	$\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ (94)
Co	0	100	Co^{2+} (87)
Ni	37	63	Ni^{2+} (53)
Cu	78	22	Cu-POB* (78)
Zn	47	53	Zn-POB* (47)
Sr	0	100	Sr^{2+} (89)
Mo	0	100	MoO_4^{2-} (80)
Cr	0	100	CrO_4^{2-} (66)
Na	0	100	Na^+ (98)
K	0	100	K^+ (98)
Ca	20	80	Ca^{2+} (70)
Mg	2	98	Mg^{2+} (85)

Влияние добавок пероксида кальция на содержание различных загрязнителей в сточном фильтрате.

По полученным в ходе экспериментов результатам, были построены гистограммы (рис. 1-4).

Как показано на рис.1, содержание $C_{\text{орг}}$, ХПК и $N_{\text{общ}}$ в обработанном фильтрате снижается за 1 сутки в соответствии с увеличением дозы реагент на 17, 21, 37 и 48% по сравнению с исходным фильтратом. Показатель ХПК уменьшается на 30-66%. Концентрация $N_{\text{общ}}$ снижается на 62 и 53% при добавках CaO_2 в 10 г/л и 20 г/л, соответственно. Максимальная доза реагента в 100 г/л приводит к падению содержания $N_{\text{общ}}$ на 74%.

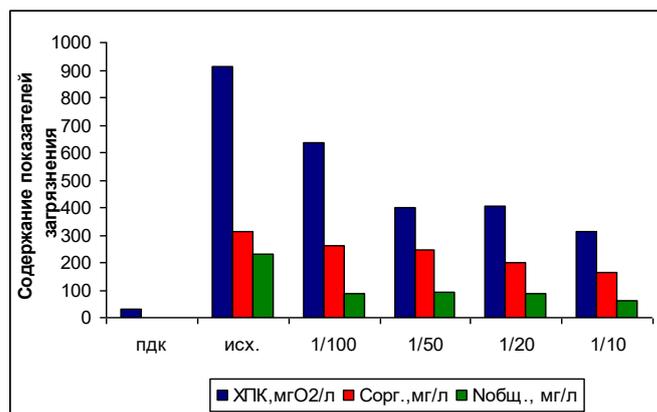


Рис. 1. Влияние добавок CaO₂ на показатели органического и азотного загрязнения.

Для оценки влияния времени контакта фильтрата с осадком CaO₂ на перечисленные показатели, смесь с соотношением 1/50 выдерживали также в течение 48 и 72 часов. Результаты показали, что содержание C_{орг} на этом временном отрезке линейно снижается с ростом времени экспозиции (рис. 2), что доказывает тот факт, что влияние CaO₂ на органическое загрязнение фильтрата носит пролонгированный характер. Следовательно, и эффективность реагента по этому показателю значительно выше, чем полученная за 1 сутки эксперимента.

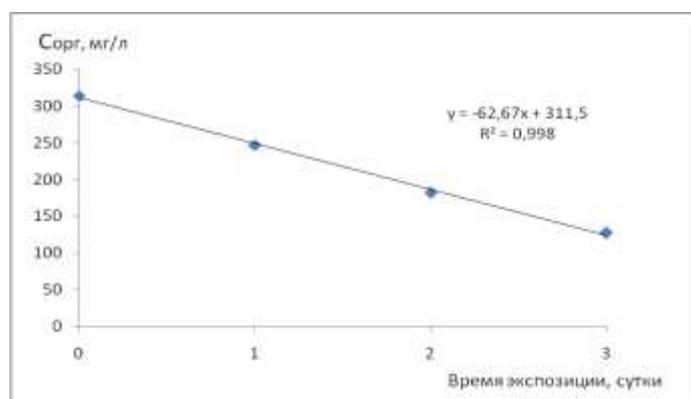


Рис. 2. Зависимость содержания C_{орг} в фильтрате полигона от времени контакта с CaO₂ при соотношении 1/50.

Изменение содержания металлов и бора в сточных водах полигона при внесении в фильтрат CaO₂ под влиянием разных доз реагента отражено на рис. 3.

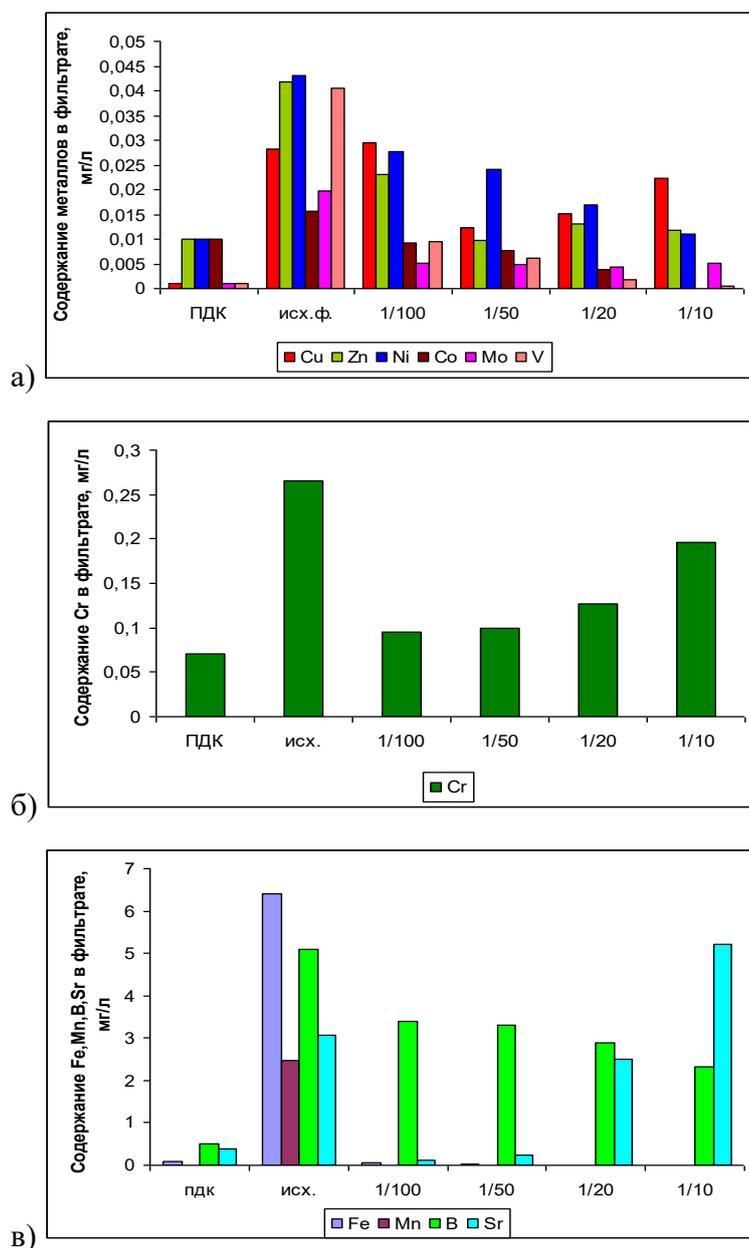


Рис. 3. Влияние добавок CaO₂ в исходный фильтрат на содержания металлов и бора: а) Cu, Zn, Ni, Co, Mo, V; б) Cr; в) Fe, Mn, B, Sr

Можно отметить снижение концентраций Fe и Mn до уровня ниже ПДК_{р/х} уже при добавке 10 г CaO₂ на 1 л фильтрата (1/100). Выведение Co, Ni, V, B из исходного раствора имеет прямую зависимость от величины навески CaO₂.

Содержание Sr в обработанном фильтрате снижается до нормативного ПДК_{р/х} при внесении 10 г/л и 20 г/л CaO₂, что, вероятно, связано с его соосаждением с гидроксидом и карбонатом Ca. Однако, при добавлении 50 г и особенно 100 г реагента, концентрация Sr в растворе растет, возможно, из-за вытеснения избытком Ca.

Для Cu и Zn зависимость имеет сложный характер. Наибольшая эффективность вывода из фильтрата этих элементов отмечается при соотношении реагент/раствор - 1/50, при дальнейшем же увеличении дозы она падает. Такое поведение этих металлов, вероятно,

связано с их нахождением в исходном фильтрате в виде комплексов с органикой (РОВ) (Cu 78%>Zn 47%>Ni 37%). Малой дозы реагента 10 г/л (1/100), по-видимому, еще не достаточно для высвобождения (за счет диссоциации комплексов и окисления РОВ) этих элементов из комплексов в течение суток, при дозе же в 20 г/л металлы осаждаются в виде гидроксидов. Рост концентрации Zn и Cu в растворе при внесении больших доз реагента, очевидно, объясняется амфотерностью их гидроксидов, растворяющихся в избытке щелочи. В отличие от них гидроксид Ni не обладает амфотерностью, чем и объясняется монотонное снижение его концентрации в растворе с ростом дозы реагента [8].

При добавлении CaO₂ фильтрат ошелачивается до pH 12,6 уже при соотношении 1:100 (рис.5). Скорость осаждения карбоната кальция и других металлов существенно зависит от pH среды – наиболее эффективное осаждение происходит при pH выше 11,0 [4]; то есть, CaO₂ обеспечивает условия для быстрого осаждения многих загрязнителей.

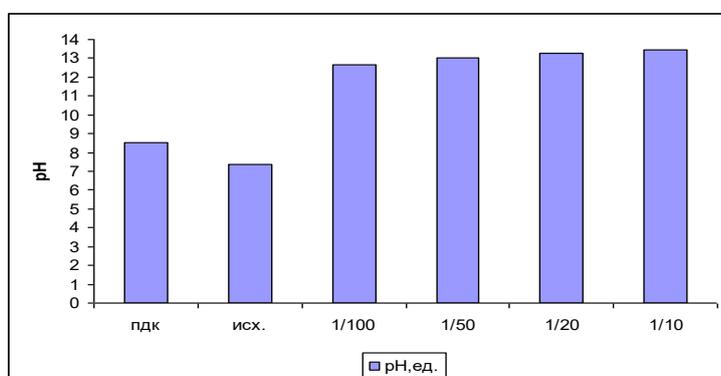


Рис. 4. Влияние добавок CaO₂ на изменение pH фильтрата

Обобщенные данные по исследованию влияния добавок CaO₂ на сточный фильтрат полигона ТПБО «Саларьево» полученные в статическом режиме, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние обработки CaO₂ на показатели загрязнения фильтрата полигона «Саларьево»

Показатель загрязнения/ элемент, мг/л	Снижение показателей загрязнения по сравнению с исходным фильтратом при разных дозах реагента, отн. %			
	1:100 (10 г/л)	1:50 (20 г/л)	1:20 (50 г/л)	1:10 (100 г/л)
Cu	0	56 ²⁾	46	21
Zn	45	76¹⁾	69	71
Ni	36	43	60	77
Co	42	50	74	99
Mo	75	75	75	75
V	76	85	95	99

Cr	64	63	52	26
Fe	99	99,9	100	100
Mn	99,9	100	99,9	100
B	33	35	43	55
Sr	96	92	18	+70 ³⁾
Ca ²⁺	61	11	+70	+92
Mg ²⁺	99	100	100	100
SO ₄ ²⁺	97	15	31	33
Cl ⁻	0	+1	+1	+3
C _{орг}	17	21	37	48
N _{общ}	62	53	62	74
ХПК, мгО ₂ /л	30	56	56	66
pH	12,6	13,0	13,3	13,5

n¹⁾ - показатель загрязнения в обработанном СаО₂ фильтрате снизился до ПДК_{р/х} и ниже;

n²⁾ - показатель загрязнения в обработанном СаО₂ фильтрате снизился, но превышает ПДК_{р/х};

+³⁾ - показатель загрязнения в обработанном СаО₂ фильтрате повысился на + n %

Анализ результатов исследований, представленных в табл. 3, показывает, что обработка фильтрата ПК значительно улучшает качество сточных вод полигона по всем показателям загрязнения. Даже при минимальной добавке реагента в 10 - 20 г/л наблюдается снижение загрязнения до уровня ПДК_{р/х}, или близкого к нему, по таким элементам, как Fe, Mn, Co, Ni, Cr, Zn, Sr. В обработанном фильтрате также существенно уменьшаются содержания Cu, V, Mo, хотя превышения над ПДК_{р/х} по этим металлам остаются на уровне 5-12 раз. Внесение пероксида кальция также снижает азотное и органическое загрязнение, причем снижение этих показателей напрямую зависит от доз реагента.

Выводы

- Внесение ПК снижает органическое и азотное загрязнение в фильтрате. При увеличении массовых добавок ПК загрязнение по C_{орг.} снижалось от 17 до 48%, по ХПК — от 30 до 66% и по N_{общ.} - от 62 до 74 %.
- Влияние ПК на органическое загрязнение фильтрата носит пролонгированный характер. Наблюдалось снижение показателя загрязнения по C_{орг.} в первые сутки на 20%, на третьи сутки — на 60% от исходной величины.
- Применение ПК разрушает органо-металлические комплексы, обеспечивая осаждение и дальнейшую иммобилизацию металлов на сорбционных барьерах.

- Добавление ПК ощелачивает фильтрат до pH-12,6, что приводит к осаждению карбоната кальция, металлов и других загрязнителей. Возврат обработанного фильтрата в тело полигона, находящегося на стадии ацетогенеза, может снижать подвижность тяжелых металлов.
- Железо, марганец, ванадий, кобальт и никель полностью, или почти полностью, выводятся из фильтрата путем обработки пероксидом кальция. Наилучший результат выведения Zn и Cu получен при соотношении ПК и фильтрата 1:50.
- Применение ПК для обработки сточных вод полигонов ТКО на начальном этапе комплексной очистки является весьма перспективным. Метод эффективен, прост в использовании и малозатратен.

Литература

1. *Артёмов А.В., Трипольская Т.А., Похабова И.В., Приходченко П.В.* Пероксид кальция – перспективный промышленный продукт. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2008, т. LII, № 2. С. 136-139.
2. *Галицкая И.В., Путилина В.С., Костикова И.А.* Оценка состояния полигона ТКО для обоснования мониторинговых исследований в пострекультивационный период. //Геология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2022, №5. С. 49-60.
3. *Глушанкова И.С.* Моделирование состава фильтрационных вод санитарных полигонов захоронения твердых бытовых отходов // Геоэкология. 2004. № 4. С. 334-341.
4. *Коныгин А.А.* Комплексная технология очистки фильтрата полигонов твердых бытовых отходов. Academia. Архитектура и строительство. 2011, №4, С. 105-109.
5. *Милютина Н.О., Смятская Ю.А., Политаева Н.А., Зеленковский П.С.* Фильтрат полигонов ТКО: образование, характеристика и обезвреживание. «Бутлеровские сообщения». 2020. том 61. №3. с.79 - 85. (1)
6. *Подлипский И.И.* Характеристика полигонов бытовых отходов как объектов геологического исследования. //Вестник СПбГУ, Сер. 7, 2010, вып.1. С.15-31.
7. *Полинг Л.* Общая химия. Пер. с англ. 1964. 584 с.
8. Рекомендации по сбору, очистке и отведению сточных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов.- М.: Госстрой РФ, 2003.- 45 с.
9. *Семенова Г.* (2021a). “Мусорная реформа” в России и введение нового налогового платежа. *Веб-конференция E3S*, 244, 10031. [doi:10.1051/e3sconf/202124410031](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124410031)
10. *Шилкина С.В.* Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России//Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020 №1, <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05ECOR120
11. *Gustafsson J.P.* Visual MINTEQ Ver, 3.1 (2013). Retrieved from <https://vminteq.lwr.kth.se> [дата обращения: 01.05.2023].
12. *Laner D.* Understanding and evaluating long-term environmental risks from landfills. PhD Thesis, 2011. - 243 p.

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЕСКОВ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ ИНЪЕКЦИОННЫМ РАСТВОРОМ ЭПОКСИДНОГО СОСТАВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ ОТ СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ

М.А. Царев, А.П. Пензев, Т.Г. Шимко (Лаборатория охраны геологической среды, ЛОГС)

Е.Н.Самарин, А.Б. Ермолинский, М.С. Чернов (кафедра инженерной и экологической геологии)

Введение

Исследование фильтрационных свойств закрепленных песков проводилось в рамках научно-исследовательской работы для предприятия по производству калийных удобрений. В связи с утечками из шламохранилища, на предприятии планируется создание противofильтрационной завесы в основании дамбы и ее примыканиях. Утечки рассолов из таких шламохранилищ являются повсеместной проблемой из-за агрессивности фильтрующихся растворов. Шлам представляет собой рассол, в основном состоящий из NaCl, с примесью других солей и минеральных частиц глинистого состава, а также ПАВов (агентов флотации). Общая минерализация жидкой фазы шлама 360-380 г/л. Состав рассолов делает невозможным при создании инъекционной противofильтрационной завесы использование суспензионных растворов цементного или глинистого состава. Эти растворы при воздействии солей будут нестойкими во времени. Для инъекционного закрепления песков предложено использовать химический гелеобразующий раствор на основе эпоксидной смолы и коллоидного кремнезема [7], который не подвержен разрушению под действием агрессивной солевой среды. Получение фильтрационных параметров закрепленных грунтов важно для осуществления прогнозного моделирования и оценки различных защитных мероприятий против утечек из шламохранилища.

В данной работе представлены результаты изучения коэффициентов проницаемости и фильтрации ($K_{п}$ и $K_{ф}$) песка, закрепленного инъекционным раствором на основе эпоксидной смолы и коллоидного кремнезема, исследовано проявление начального градиента фильтрации (I_0). В задачи исследований входило: оценка вязкости фильтрующихся жидкостей; испытание длительной фильтрацией образцов, закрепленных в физической модели в двух исходных состояниях: 1) сухом и 2) в состоянии насыщения песка рассолом из шламохранилища.

Установка для проведения лабораторных фильтрационных опытов с постоянным градиентом напора

По данным предварительных исследований инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы закрепленный этим раствором песок имеет довольно низкую проницаемость, порядка 10^{-5} м/сут. Исследование проницаемости такого материала потребовало применения специальной установки.

Для проведения фильтрационных испытаний разработан автоматизированный комплекс (рис. 1) (решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2023130307 от 21.11.2023) [13], который имеет регулируемую подачу воды пневматическим способом. Установка дополнена цифровыми датчиками температуры и давления, значения с которых используются для расчета проницаемости и автоматически считываются при регистрации расхода разработанным расходомером (патент №2803394, 12.09.2023) [19]. Это позволяет одновременно производить опыт на большом количестве образцов, для которых при этом можно задавать разный состав и температуру жидкости, а элементы фильтрационного комплекса выполнены из химически нейтральных полимерных материалов, чтобы предотвратить возможные химические реакции с изменением состава жидкости и коррозии [12] на контакте с образцом.

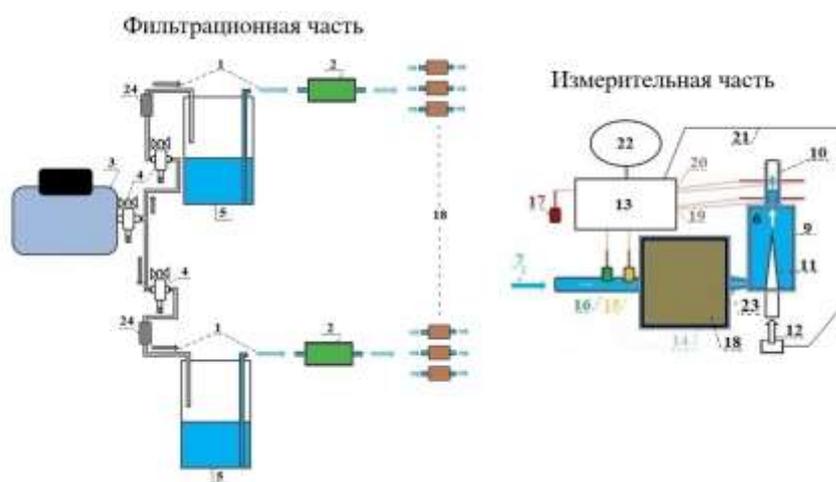


Рис. 1. Автоматизированный комплекс для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов (1 – подача воздуха и воды постоянного давления; температурный регулятор; 3, 12 – компрессор; 4 – регулятор давления воздуха со сборником конденсата; 5 – колба с водой (раствором) заданного давления и температуры; 6 – автоматический расходомер сверхмалых потоков; 7 – источник подачи воды (водопровод, колба); 8 – регулятор давления воды; 9 – приемная камера расходомера; 10 – измерительная трубка; 11 – продувочный клапан; 13 – плата с контроллером; 14 – термоизоляция; 15 – датчик температуры раствора; 16 – датчик давления раствора; 17 – датчик атмосферного давления и температуры; 18 – герметичная емкость с образцом; 19, 20 – вход первой и второй пар электродов через потенциометрический датчик; 21 – управляемое питание малогабаритного компрессора; 22 – персональный компьютер или дисплей с модулем памяти; 23 – вход для подвода фильтрата; 24 – обратный клапан.

Емкости для фильтрационных испытаний созданы самостоятельно и выполнены из полимерных материалов (полипропилен, фторопласт, оргстекло) (рис. 2) для исключения коррозии на контакте с образцом и раствором, что имеет место при длительных испытаниях на стандартных фильтрационных приборах, о чем указано в статье [12]. Образец связного грунта может герметизироваться мастикой по стенкам как указано на средней схеме, или по принципу работы камеры трехосного сжатия (или пермеаметра [21]), герметизируя пристеночное

пространство образца давлением воды, при этом все ёмкости выполняются из инертных материалов.

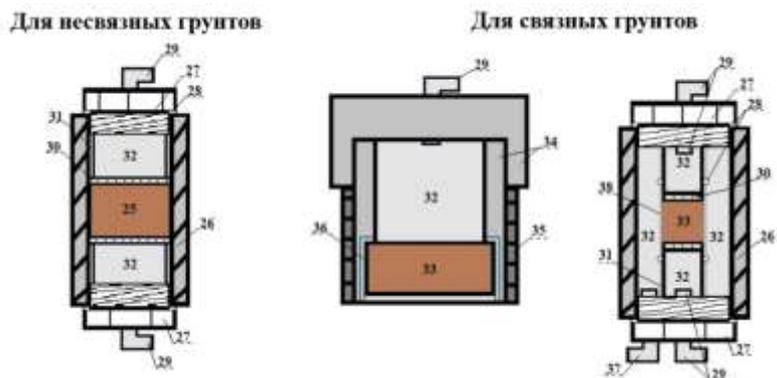


Рис. 2. Полимерные ёмкости для размещения образцов (25 – сыпучий материал заданной плотности; 26 – прозрачный корпус емкости для образца; 27 – резьбовая заглушка; 28 – уплотнительное кольцо; 29 – фитинг угловой с резьбой для фильтрационной трубки; 30 – твердый пористый фильтр; 31 – проставки, ограничивающие высоту образца; 32 – жидкость; 33 – образец твердого материала; 34 – корпус емкости образца; 35 – стальная гильза; 36 – герметизирующая мастика; 37 – фитинг угловой с резьбой для создания бокового обжатия.

Подготовка закрепленных образцов

Инъекционное закрепление песков для последующего изучения их проницаемости выполнено на физической модели, общий вид которой представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид установки для инъекционного закрепления песчаных грунтов в лабораторных условиях

Высота модели составляет 35 см, масса песка 135 кг. Заполнение модели песком производилось с послойной трамбовкой. Раствор подавался через вертикальный иньектор в центре модели, давление нагнетания 25-50 кПа. Объем закаченного раствора 17,6 л.

В составе инъекционного раствора эпоксидная смола ДЭГ-1, коллоидный кремнезем, полиэтилен-полиамин (отвердитель). Время гелеобразования 2 часа.

Выполнено два варианта закрепления. В первом исходный песок имел воздушно-сухую влажность, во втором песок был насыщен рассолом, отобраным из шламохранилища. После проведения инъекции массив выдерживался в течение 1 недели до окончания основного процесса отверждения раствора, после чего из закрепленного песка были отобраны образцы, на которых проводились фильтрационные испытания. Всего было испытано на фильтрационные свойства 7 образцов: 3 образца – насухо закрепленного песка, и 4 образца – закрепленные в состоянии насыщения рассолом.

Проведение фильтрационных испытаний

В ходе опыта велся учет температуры воды, воздуха, давления раствора на входе в образец и атмосферное давление с помощью датчиков, показанных на рис. 1. Результаты измерений могут быть интерпретированы в графическом виде (рис. 4).

Для пробных опытов использована трубка диаметром 2 мм с расстоянием пар около сантиметра, регистрируемый ею расход за час составляет до десятитысячной кубического сантиметра в минуту.

Поправка значений K_f для их сравнения при расходах, снятых с разной температурой, позволяет вычислить коэффициент фильтрации, приведенный к температуре $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно ГОСТ 25584 — 2016 (Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации) [3].

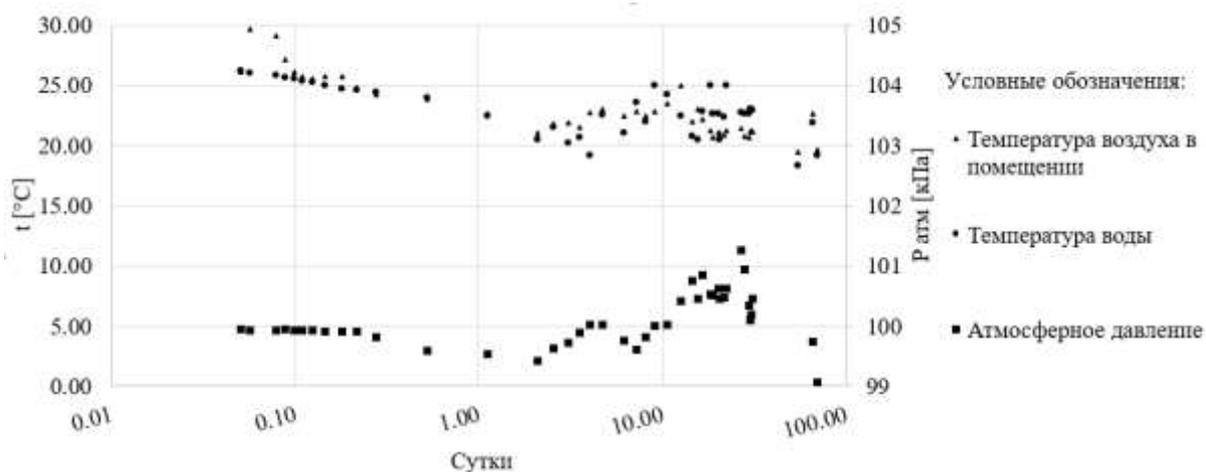


Рис. 4. Условия выполнения фильтрационного испытания на образцах №№1-3

Для точных исследований влияния минерализации и температуры используется характеристика фильтрационного сопротивления – K_p [Д] (Дарси), учитывающая динамическую вязкость (η) [сП], при этом кинематическая вязкость (ν) [$\text{мм}^2/\text{с}$] изучается на вискозиметре (рис.5)

при нужной температуре согласно ГОСТ 33768—2015 (Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей) [5].

Оценка вязкости фильтрующихся жидкостей

Фильтрационные опыты на образцах закрепленного песка выполнены на двух типах жидкости: водопроводной воде и солевом растворе, отобранном из шламохранилища. Оценка коэффициента кинематической вязкости жидкостей (ν) выполнена с учетом ГОСТ 33768—2015 [5]. Оценка времени истечения жидкости произведена на вискозиметре ВПЖ-4 0.37 (рис. 5).



Рис. 5. Используемый вискозиметр ВПЖ-4 0.37

Результаты оценки ν и расчета коэффициента динамической вязкости (η) представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты оценки вязкости

Водопроводная вода			Солевой раствор		
t, с*	ν , мм ² /с	η , сП	t, с*	ν , мм ² /с	η , сП
343.3	1.03	1.03	515.20	1.55	1.84
375.6	1.13	1.13	517.50	1.55	1.85
370.3	1.11	1.11	509.90	1.53	1.82

* – время истечения жидкости в опыте

Таким образом, вязкость η для водопроводной воды составила 1,09 сП, солевого раствора – 1,84 сП.

Испытание образцов сухого закрепленного песка из физической модели длительной фильтрацией

Определение фильтрационных характеристик закрепленного песка выполнено на трех образцах с регистрацией расхода в течение 70 суток. Результатом испытания является оценка K_f и I_0 образцов. Геометрические параметры цилиндрических образцов (рис. 6) до их установки в фильтрационную камеру приведены в таблице 2. Плотность составила 1,9-1,93 г/см³, площадь поперечного сечения 4,7-4,72 см², высота (в направлении фильтрации) 10,63-10,82 см. После фотофиксации и обмера каждый из трех образцов вклеен в полипропиленовую обойму эпоксидной мастикой, обоймы с образцами перед фильтрацией высушены на открытом воздухе в течение 3 суток при температуре 28,5-29,7 °С.

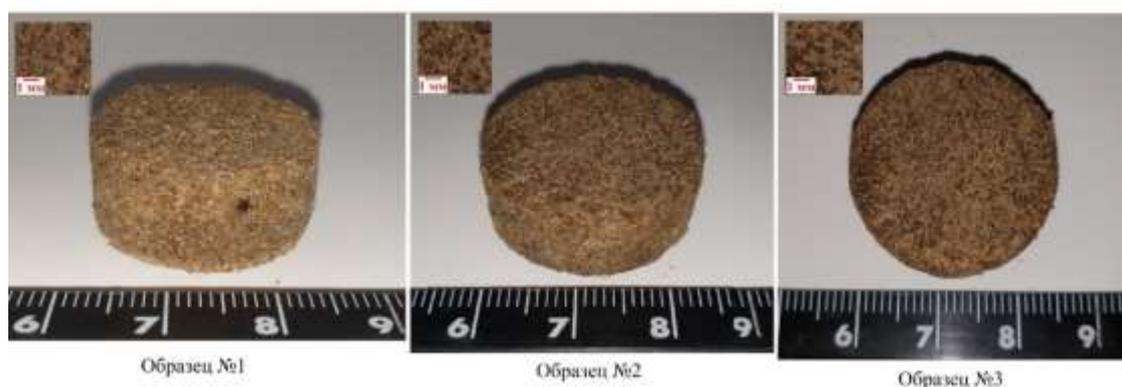


Рис. 6. Общий вид испытуемых образцов 1 - 3

Таблица 2

Параметры образцов

Образец	Масса, г	Высота, мм	Диаметр, мм	Плотность, г/см ³	Площадь сечения, см ²
1	9.66	10.63	24.51	1.93	4.72
2	9.7	10.69	24.48	1.93	4.70
3	9.72	10.82	24.53	1.90	4.72

В качестве раствора для фильтрации использована водопроводная вода с минерализацией 146 мг/л и рН 7,8. В течение 70 суток образцы подвергались фильтрации при различном градиенте напора, при этом для трех образцов давление на входе в них одинаково. Расчет K_f произведен согласно основному закону фильтрации ($V = -K_f \cdot \nabla H$), при скорости фильтрации V из регистрируемого расхода, площади поперечного сечения образца и давлений на его торцах I [см вод.ст./см], рассчитанного с учетом колебаний атмосферного давления на выходе из образца (рис. 4).

Учет поправки в значения K_{ϕ} [см/с] на температуру воды, регистрируемую датчиком температуры фильтрационной установки, произведен согласно ГОСТ 25584 — 2016 [3] по формуле (1):

$$K_{10} = 864 \cdot \frac{K_{\phi}}{(0.7+0.03 \cdot T)} \quad (1)$$

K_{10} — Коэффициент фильтрации, приведенный к температуре 10 °С

T — температура воды при испытании

Графики временного прослеживания при различных ступенях давления представлены на рисунках 7-9.

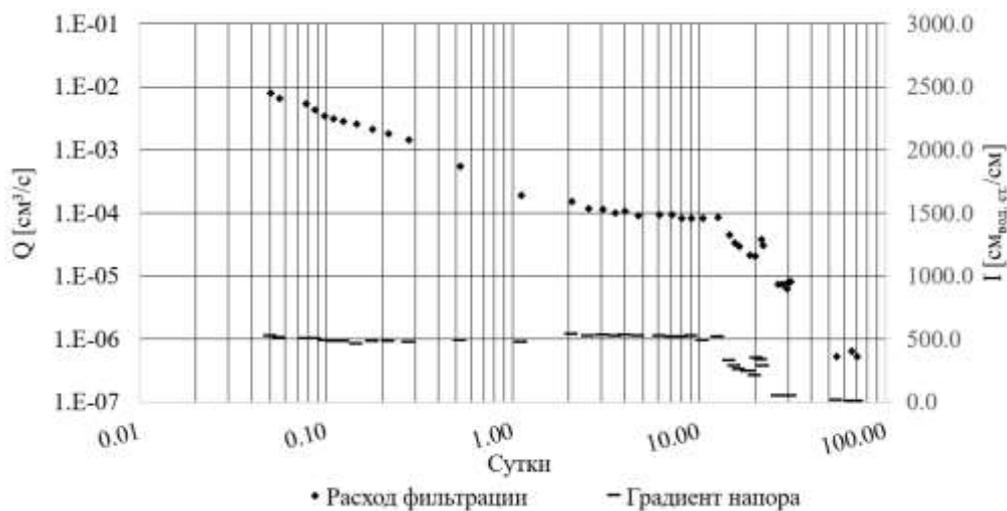


Рис. 7. График временного прослеживания расхода фильтрации через образец №1

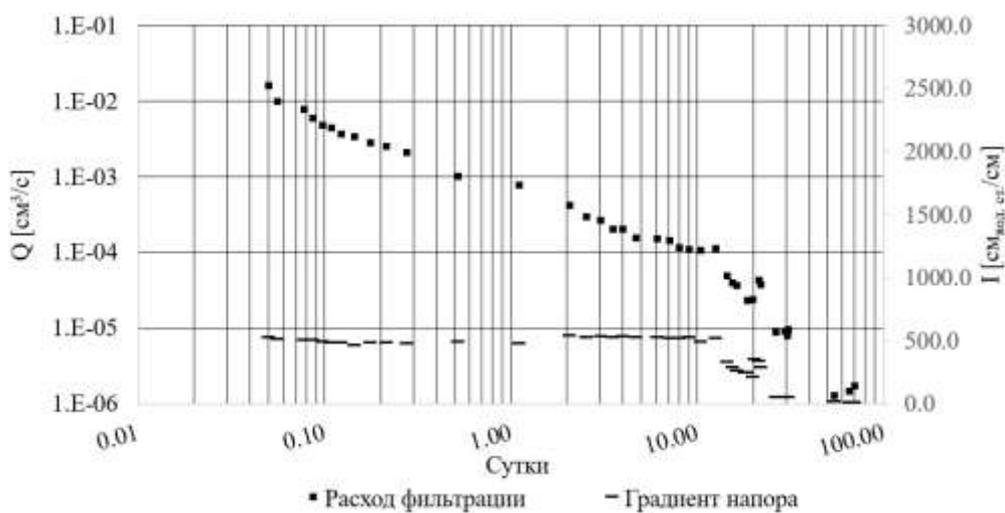


Рис. 8. График временного прослеживания расхода фильтрации через образец №2

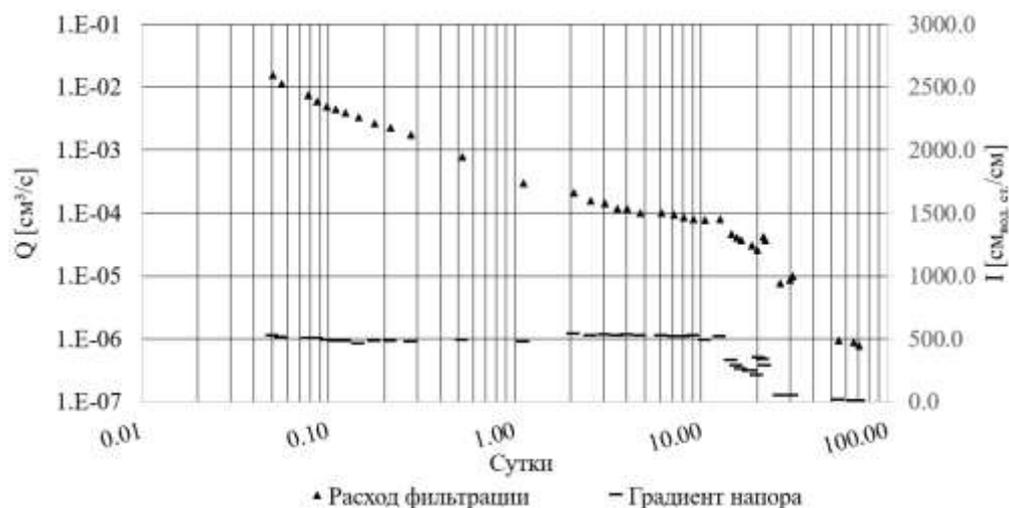


Рис. 9. График временного прослеживания расхода фильтрации через образец №3

Результаты оценки K_{ϕ} при различных ступенях давления, приведенные к условиям фильтрации при температуре 10 °С, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты оценки K_{ϕ} при стационарном режиме фильтрации

Стабилизация ступени давления t, [сут]	№ образца	I [см _{вод.ст.} /см]	V [см/с]	K_{ϕ} [м/сут]
2.6-6.2	1	523.5	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$
	2	520.6	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$
	3	514.3	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$3.3 \cdot 10^{-5}$
18.2 - 20.0	1	231.3	$5.8 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
	2	230.0	$6.4 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-5}$
	3	227.2	$7.0 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-5}$
20.6 – 22.2	1	338.5	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-5}$
	2	336.6	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$
	3	332.6	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$
26.7 – 31.0	1	49.57	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$

	2	49.29	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$
	3	48.7	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
38.8 – 54.9	1	9.3	$9.5 \cdot 10^{-7}$	$8.2 \cdot 10^{-6}$
	2	9.3	$2.7 \cdot 10^{-7}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
	3	9.1	$2.0 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
66.0 – 70.0	1	7.1	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$8.0 \cdot 10^{-6}$
	2	7.1	$3.6 \cdot 10^{-7}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
	3	7.0	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$

На образцах №1-3, выполнена оценка начального градиента фильтрации. По результатам фильтрационного опыта со ступенчатым изменением градиента напора построен график зависимости скорости от градиента напора $V(I)$ (рис. 11).

Из графика следует, что на исследуемых образцах может наблюдаться отклонение от линейного закона фильтрации со значениями I_0 менее 1,2 – 4,5, при этом продолжение опыта при еще меньших давлениях может показать отсутствие начального градиента на образцах. Средние значения K_f [м/сут] для образцов №№1, 2, 3 (таблица 3) с учетом значений предположительного имеющегося начального градиента фильтрации (рис. 11) составляют $3.6 \cdot 10^{-5}$, $3.2 \cdot 10^{-5}$, $2.7 \cdot 10^{-5}$, эти значения существенно не отличаются от исходных.

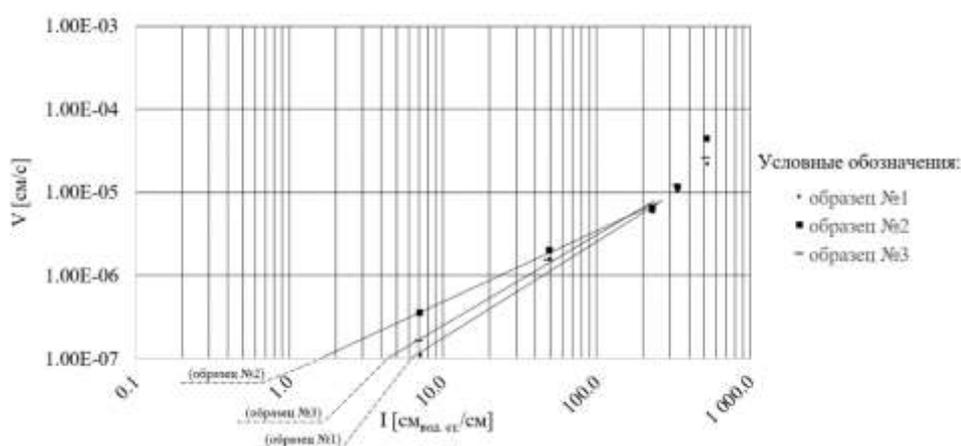


Рис. 11. Графики зависимости скорости фильтрации от градиента напора

Оценка проницаемости закрепленного песка из физической модели при фильтрации солевого раствора

Проницаемость образцов песка, закрепленного в состоянии насыщения солевым раствором, изучена при постоянном напоре (два образца) и при переменном напоре (один образец). На завершающем этапе испытания произведена оценка возможности проявления фильтрации через исследуемый материал при различных скоростях фильтрации (на образце №7).

Образцы закрепленного соленасыщенного песка (№№ 4-7) имеют прочность ниже, чем образцы, закрепленные в сухом состоянии (№№ 1-3), так образец № 4 был деформирован в процессе первой подготовки фильтрационной камеры и выбыл из опыта.

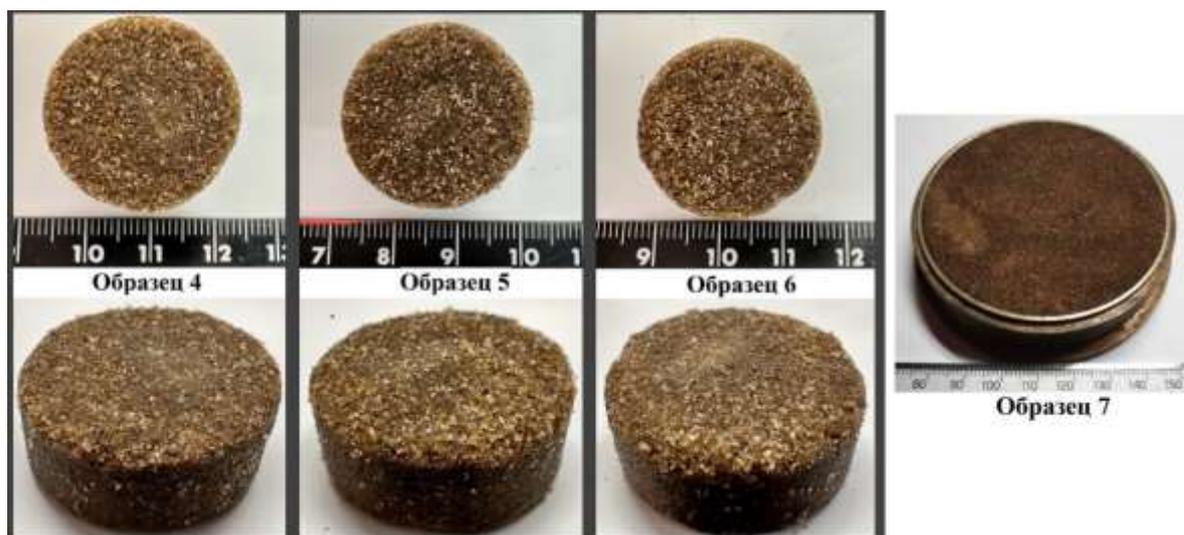


Рис. 12. Общий вид образцов 4 - 7

Таблица 4

Параметры образцов

Образец	Масса, г	Высота, мм	Диаметр, мм	Плотность, г/см ³	Площадь сечения, см ²
4	10.01	10.63	24.94	1.93	4.88
5	10.20	10.82	24.88	1.94	4.86
6	9.97	10.57	24.51	2.0	4.72
7	167.80	15	71.30	-	39.9

Коэффициент проницаемости образцов №№4-6 оценен согласно зависимостям (3, 4) [17].

$$K_{п} = V \cdot \eta \cdot I_{ф}^{-1} \quad (3)$$

$$I_{\phi} = \frac{\gamma \cdot \Delta H}{L} \quad (4)$$

Где: γ – объемный вес жидкости; L – высота образца.

Результаты оценки проницаемости образцов 4-6 представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты оценки проницаемости

Образец	V, см/с	I атм/см	η , сП	$K_{п}$, Д
4	Выбыл			
5	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$1.67 \cdot 10^{-2}$	1.84	0.48
6	$4.6 \cdot 10^{-3}$	$1.71 \cdot 10^{-2}$		0.49

Исследуемый по методике ГОСТ 25584-2016 (п. 4.4) образец №7 представлен на рисунке 10 и имеет размеры, указанные в таблице 4. Опыт проводился на приборе ПКФ – 01 (рис. 13) фильтрация велась при переменном напоре с применением солевого раствора в качестве фильтрующейся жидкости. Регистрация данных (понижение, время) производилась в ручном режиме.



Рис. 13. Фильтрационный прибор ПКФ-01

В ходе испытания регистрировалось снижение уровня воды в пьезометре и время замера. После проведения испытания по методике ГОСТ 25584-2016 п. 4.4, строился график в координатах $\ln(H_0/(H_0-S)) - C \cdot t$,

где: H_0 - начальный напор воды в пьезометре, см;

S - снижение уровня воды в пьезометре, см;

t - время, за которое происходит снижение на величину S, см;

C - величина, равная отношению площади образца к площади пьезометра и толщине образца, см.

Коэффициент фильтрации (см/с) находится из отношения (5):

$$K = \Delta \ln \left(\frac{H_0}{H_0 - S} \right) / \Delta Ct \quad (5)$$

Расчетные графики зависимости $\ln(H_0/(H_0-S))$ – C·t при разных градиентах представлены на рисунках 14-16.

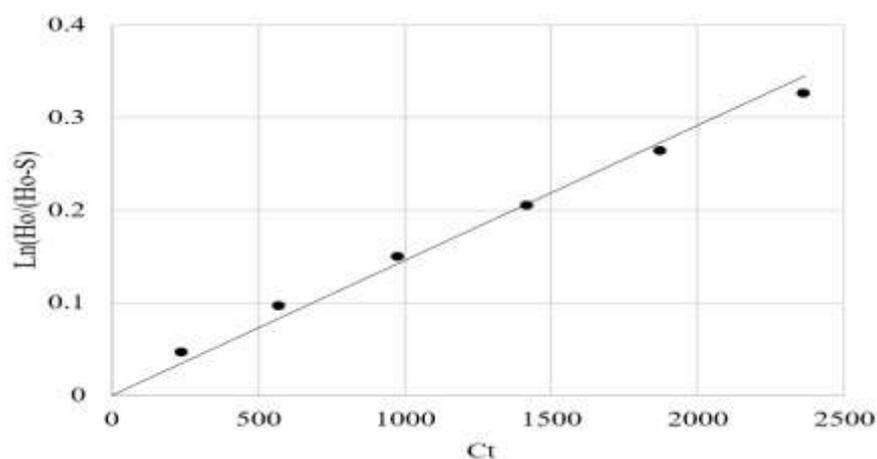


Рис. 14. График для оценки проницаемости образца по ГОСТ 25584-2016 п. 4.4 (образец №7, при I 13.7-10.3)

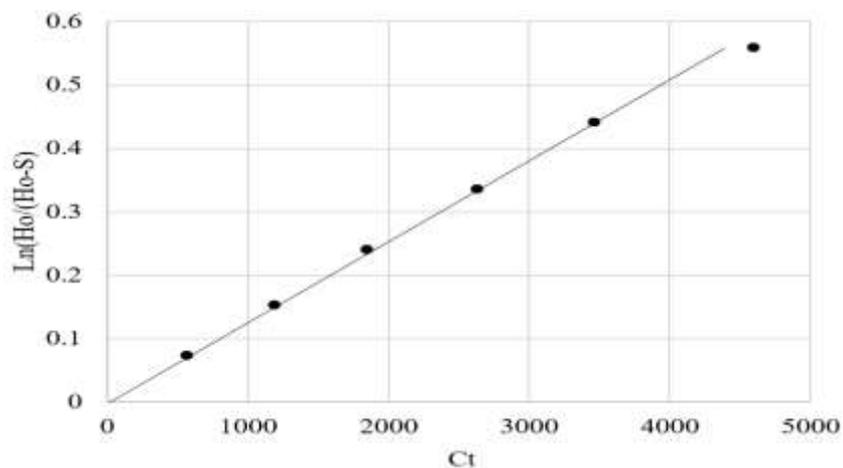


Рис. 15. График для оценки проницаемости образца по ГОСТ 25584-2016 п. 4.4 (образец №7, при I 8.7-5.3)

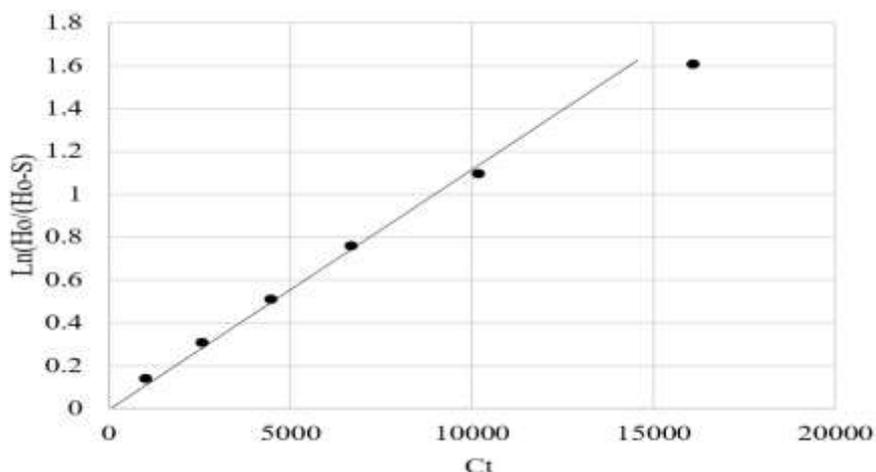


Рис. 16. График для оценки проницаемости образца по ГОСТ 25584-2016 п. 4.4 (образец №7, при I 4.3-1)

Оценка коэффициента проницаемости по результатам фильтрационного опыта произведена с использованием формулы (5) с учетом коэффициента кинематической вязкости жидкости (6):

$$K_p = K_\phi \frac{\nu}{g} \quad (6)$$

Где: ν – коэффициент кинематической вязкости; g – гравитационная постоянная.

Таблица 6

Результаты оценки проницаемости образца №7

Номер опыта	$K_p, Д$
1	0,24
2	0,20
3	0,18

Для оценки возможности фильтрации солевого раствора при различной разности напоров, по данным представленным на рисунках 14-16 выполнен расчетный переход к условному расходу при снижении напора, результаты зависимости фильтрации от разности напора представлены на графике 17.

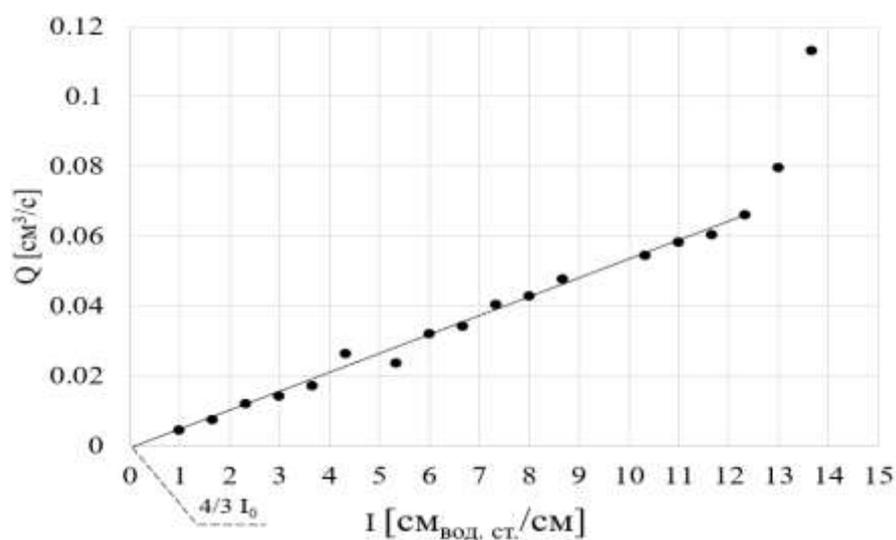


Рис. 17. График для оценки зависимости скорости фильтрации от градиента напора (образец №7)

Анализ графика, представленного на рисунке 17, позволяет сделать вывод о том, что начальный градиент фильтрации в опыте не проявляется, и фильтрация через образец возможна при градиенте напора со значением меньше единицы. Однократно оцененные значения K_p [Д] для образцов №№5, 6, 7 (таблицы 5,6) составляют 0,48; 0,49; 0,2. Требуется проверка этих свойств с учетом длительной фильтрации, аналогично выполненной для образцов №№1-3.

Выводы

Выполненные исследования фильтрационных свойств закрепленных эпоксидным раствором песков позволили получить значения коэффициентов фильтрации образцов с низким коэффициентом фильтрации (у закрепленных насухо песков K_f составил $2,0 \cdot 10^{-5} - 8,0 \cdot 10^{-6}$ м/сут), а также проницаемость песков, закрепленных в состоянии насыщения рассолом, при фильтрации солевого раствора (K_p порядка 0,2-0,4 Дарси).

Разработанная установка для изучения фильтрационных свойств слабопроницаемых грунтов позволяет исследовать изменение проницаемости в течение длительного времени, а также проводить фильтрацию агрессивных растворов и изучать вынос элементов из образца в процессе фильтрации.

В исследованных образцах наличие начального градиента напора обнаружено не было.

Литература

1. Воронков М.Е., 2013. Взаимодействия кремнеземсодержащих добавок в цементных композициях в условиях щелочного расширения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук, 05.17.11.

2. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П., 1986. Проницаемость и фильтрация в глинах. Недра, Москва, 160 с.
3. ГОСТ 25584-2016 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации.
4. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости
5. ГОСТ 33768-2015. Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей.
6. Лотов В. А., 2015. Применение модифицированного жидкостекольного вяжущего в производстве строительных материалов. Строительные материалы, №1, с. 72-75.
7. Пензев А.П, Самарин Е.Н. Патент «Инъекционный раствор для закрепления пескосодержащего массива». Авторы Пензев Антон Петрович (RU), Самарин Евгений Николаевич (RU). ИЗ №2785603. Опубликовано: 09.12.2022 Бюл. № 34
8. Семенов В. Б., Ключев А. Н., 2009. Щелочно-силикатный бетон с добавкой целлюлозы. Гидротехническое строительство, № 4, с. 59-61.
9. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.
10. СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. Основные положения.
11. Тольпина Н. М., 2016. Физико-химические основы повышения коррозионной стойкости цементных систем путем оптимизации вещественного состава. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Белгород, 50 с.
12. Царев М. А., Лободенко И. Ю., 2024. Методы оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов, учет воздействий на проницаемость. Фундаменты №1 - 2024, М., с. 44.
13. Царев М. А., 2022. Результаты использования экспериментального фильтрационного комплекса с автоматизированной системой сбора информации для оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов. Материалы XVII общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», М., с. 442.
14. Царев М. А., 2023. Экспериментальная оценка устойчивости фильтрационных параметров искусственных грунтов. Материалы XVIII общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», М., с. 269.
15. Царев М. А., Лободенко И. Ю., 2023. Экспериментальная оценка противифльтрационных свойств пористых материалов для долговременной защиты зданий и сооружений. Сборник тезисов докладов XV Российской Национальной Конференции по

- сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). Сочи, 9–13 октября, с. 172-178.
16. Царев М. А., Лободенко И. Ю., Понизов А. В., Родин А. В., 2023. Экспериментальная оценка изменения фильтрационных свойств геохимического барьерного материала на основе бетона при растворении. Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: труды V всероссийской научной конференции с международным участием им. проф. С. Л. Шварцева, Томск, с. 95-100.
 17. Шестаков В. М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во «КДУ», 2009. с. 37-41.
 18. Элбакидзе М. Г., 1988. Фильтрация воды через бетон и бетонные гидротехнические сооружения: учебное пособие. Библиотека гидротехника и гидроэнергетика. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 104 с.
 19. Царев М. А. Патент РФ № 2803394, 12.09.2023. Расходомер сверхмалых потоков.
 20. Dixon D.A., Graham J., Gray M.N., 1999. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. *Can. Geotech. J.* 36: 815–825
 21. Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

КОММЕНТАРИИ
К ПОДТОПЛЕНИЮ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ИНВЕРСНОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ
ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ, ЗАДАЧАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ
(НА ПРИМЕРЕ РУБЦОВСКОЙ НАБЕРЕЖНОЙ ЯУЗЫ)

М. В. Лехов

Определяющие природно-технические характеристики строительства

- Абсолютные отметки рельефа участка сооружения $\approx 127 - 131$ м. На северо-западе в 300 м от сооружения, на водоразделе, отметки достигают 144 м. В юго-восточном направлении, на пойме Яузы, рельеф пологий с отметками 127,5 – 128,5 м.
- Река Яуза расположена в 220 м. Отметка уреза 123 м, ширина – до 24 м. Глубина реки, мощность и плотность донного осадка – не определены.
- Абсолютные отметки основания фундамента 117,7 и 121,3 м. Абсолютные отметки противифльтрационной завесы 109 - 112 м.
- Контур сооружения вытянут по падению рельефа и по направлению потока грунтовых вод к реке Яуза, ширина препятствия потоку 110 м.
- В 400 м со стороны водораздела проходит тоннель диаметром 5,5 м, отметка заложения 110 м, - то есть, в интервале залегания измайловского водоносного горизонта. Рядом проходит тоннель диаметром 13,8 м с отметками основания от 120 до 108 м, то есть в интервале залегания грунтовых вод.

Гидрогеологическая характеристика

При решении задач с *заведомо незначительным влиянием* строительства область рассмотрения достаточно ограничивать радиусом, как правило, порядка 2-3 размеров сооружения в плане. Незначительное влияние определяется следующими причинами:

- Слабый подпор, благодаря сравнительно высокой проводимости пластов, малым расходам потоков, преобладанию нисходящего перетекания в балансе активной зоны водообмена (на что указывают близкие по горизонтам уровни воды и их незначительные градиенты).
- Незначительное влияние водопонижения на прилегающей площади, - при откачке в замкнутом противифльтрационном контуре и высоких значениях проводимости горизонтов.

Генерализация слоистого разреза (рис. 1) исходит из задачи и особенностей залегания слоев и соотношения напоров, что позволяет прийти к местной расчетной схеме. На удаленных же участках схема может оказаться непригодной, потребуется иная генерализация.

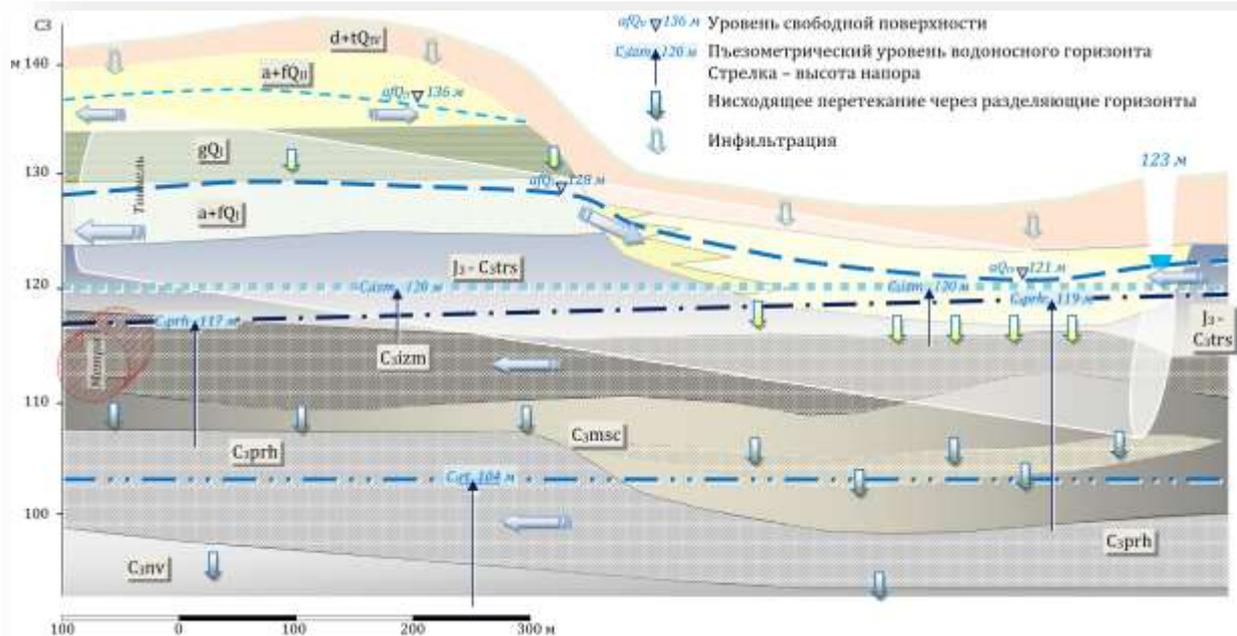
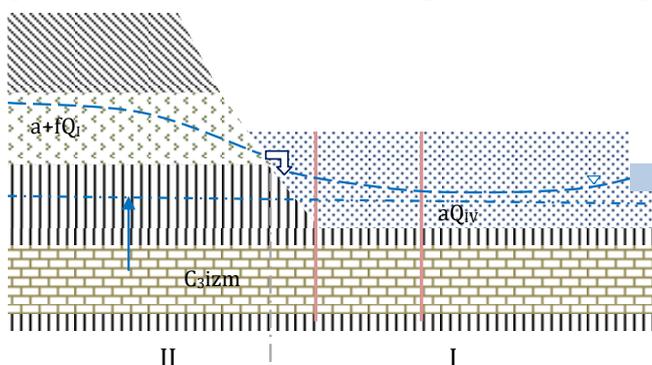


Рис. 1. Генерализация гидрогеологического разреза правого борта долины. Слои объединены в горизонты: водоносные aQ_{IV} , $a+fQ_{II}$, C_{3izm} , C_{3prh} и разделяющие gQ_I , J_3-C_{3trs} , C_{3msc} , C_{3nv} - по гидравлическому единству и разобщению потоков подземных вод.

Особенность территории - скрытая разгрузка надьюрского водоносного горизонта в аллювий поймы (рис. 2) в тыловой части. Отметки подошвы надьюрского горизонта на междуречье выше свободной поверхности безнапорного потока в аллювиальном горизонте поймы. Эти горизонты для гидродинамических расчетов не могут быть объединены в один. Изменения уровней одного не могут сказываться на уровнях другого вблизи границы. Водоносные горизонты для удобства расчетов могут участвовать в фильтрационной схеме как единая система, но тогда цокольный уступ должен характеризоваться особым внутренним граничным условием. Фильтрационное сопротивление при таком типе границы служит



ограничением развитию подпора в сторону высокой террасы.

Рис. 2. Водоносные горизонты, на которые может влиять строительство. Провисание потока на пойме. Два типа: пойма (I) и терраса (II); ∇ - разгрузка надьюрского горизонта в аллювиальный.

Гидродинамические условия

Подземная гидродинамика долины Яузы имеет ряд определяющих при рассмотрении задач проектирования факторов:

- Через разделяющие глинистые слои сверху вниз для всех водоносных горизонтов зоны активного водообмена происходит интенсивное перетекание, которое превышает расходы латеральной фильтрации.
- На территории поймы перетекание из аллювиального горизонта столь велико, что в центральной ее части наблюдается депрессия поверхности грунтовых вод. Поток грунтовых вод в аллювиальном горизонте поймы получает латеральное питание за счет (а) скрытой разгрузки по склону террасы и (б) встречного транзита потока со стороны левого берега, под Яузой. Линейный односторонний расход не превышает десятые доли куб. м/сут/м.
- Питание грунтовых вод происходит за счет атмосферных осадков и потерь из водопровода и канализации. В сумме инфильтрация превышает 200 мм/год или 0,00055 мм/сут.
- Величина перетекания в центральной части поймы превышает инфильтрацию и составляет 0,0007-0,001 м/сут. Разгрузка грунтовых вод происходит путем перетекания вниз в центральной части поймы.
- Соотношение величин площадных расходов питания и перетекания подтверждаются практически одинаковыми уровнями воды аллювиального 121-122 м и измайловского 120-121 м горизонтов.
- Уровни реки Яузы 123 м на участке исследования превышают уровни грунтовых вод правого берега на 1-1,5 м. Из-за кольматации дна гидравлическая связь подземных и поверхностных вод здесь затруднена. Поэтому в расчетах плановой фильтрации Яуза не является гидродинамической границей первого рода и может рассматриваться как внутренняя граница, участие которой в расчетах затруднено неизвестным, высоким сопротивлением ложа.
- В сторону от долины на СЗ, на террасе р. Москвы, проницаемость пород горизонта юрских и трошковских глин уменьшается, и расход перетекания оценивается значениями порядка 0,0001 м/сут. Поэтому уровни надьюрского и измайловского горизонтов имеют разницу от 7 м до 11 м
- Водоносные горизонты верхнекаменноугольных известняков – измайловский и перхуровский характеризуются горизонтальным положением пьезометрических поверхностей (с небольшими уклонами, противоположными направлению разгрузки надьюрских вод в долину Яузы). Разница между ними незначительна, 1-3 м. Причины в

том, что на нижние горизонты влияют техногенные факторы, определяющие общую для Москвы картину инверсии напоров. Кроме того, отсутствие значимых для расходов градиентов объясняется высокими проводимостями пластов, возможно, в сотни кв. м/сут.

- Значительное влияние на отсутствие градиентов фильтрации в плане и близкие напоры каменноугольных горизонтов оказывает повышенная проницаемость пород разделяющего горизонта мещеринских глин и мергелей. Перетекание и высокая проводимость обуславливает пологий, близкий к горизонтальному характер поверхностей напоров.
- Четвертичные отложения и породы верхнекаменноугольных горизонтов с трещинными и карстовыми зонами имеют проницаемости, значения которых ближе к верхнему пределу, возможно, и выше оценок по справочным и литературным данным.

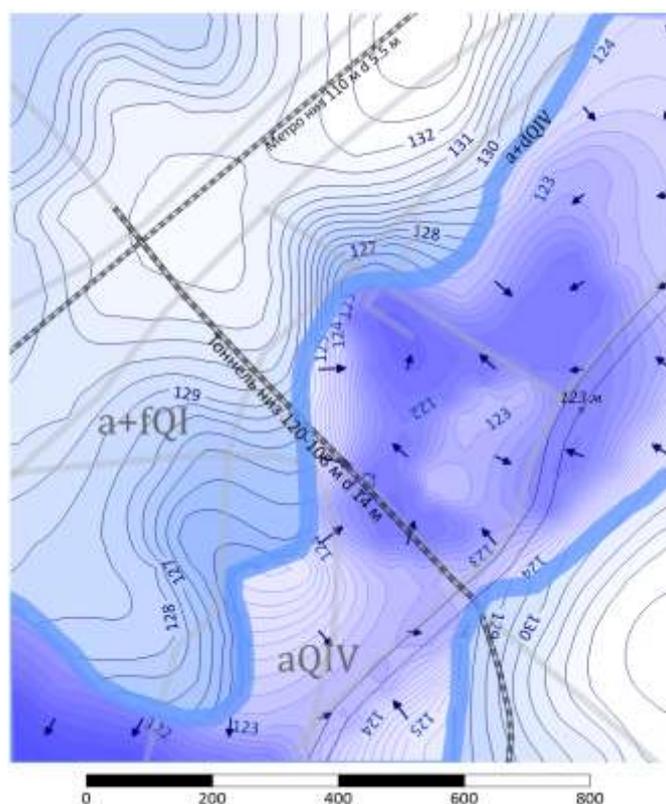


Рис. 4. Гидроизоги́пы водоносных горизонтов: надъюрского a+fQI Ходынской террасы и аллювиального aQIV поймы Язуы. Полоса с индексом a+dQIV - скрытая разгрузка надъюрского горизонта, разобщающая потоки подземных вод.

- Подпор от слабопроницаемого ограждения выражается в первых десятках сантиметров и не изменяет характерные особенности питания, разгрузки и условий залегания потоков подземных вод, не представляет угрозу подтопления. Еще меньшее влияние при условии качественного исполнения работ по противофильтрационному ограждению оказывает водопонижение внутри контура завесы.

- Осушение котлована внутри контура завесы требует понижения уровня грунтовых вод ниже поверхности напоров измайловского горизонта. Без водопонижительной откачки из измайловских известняков при определенных условиях может произойти выпор глинистых пород в дне котлована.
- Параметры и режим водопонижения в такой схеме могут быть охарактеризованы не на региональных моделях, а локальными фильтрационными расчетами скважин строительного дренажа или водоотлива. производство работ состоит из двух этапов: понижение до пьезометрической поверхности напорного пласта и затем совместная откачка из верхнего и нижнего горизонтов.

Краткие выводы

1. Подпор грунтовых вод *в рассматриваемых условиях* крайне незначителен, намного меньше сезонных колебаний уровня и погрешности прогнозов. Задачи подтопления неактуальна. Вывод может быть сделан просто из качественного анализа разрезов и карт.
2. Водопонижение оказывает ничтожное влияние на грунтовые воды и не может привести к деформациям грунтов и строений. Причина – водопонижение и водоотлив производится внутри замкнутого противофильтрационного контура.
3. Строительство не может оказать влияния на измайловский горизонт. Причина – их высокая проводимость и отсутствие латерального потока.
4. Поступление воды внутри противофильтрационного контура зависит от проницаемости завесы, от ее качества.
5. Основным по эффекту воздействия типом эксплуатационного дренажа является пластовый дренаж в основании фундаментной плиты.
6. Взвешивающее воздействие на сооружение *при работе эксплуатационного дренажа* незначительно. Но выход из строя дренажа в многоводный год может привести к превышению взвешивания над весом сооружения.
7. Мониторинг подземных вод должен быть сосредоточен вдоль контура и, дополнительно, в пластовом дренаже. Пункты наблюдений – гидрогеологические скважины в простенке, за контуром завесы и пьезометры на пластовый дренаж.
8. Условием обеспечения работоспособности дренажа является мониторинг уровней воды в скважинах и пьезометрах. Должен соблюдаться регламент периодической и профилактической промывки коллекторных дренажных труб. Водоотведение – принудительное, из коллекторных колодцев.

ГОЛОЦЕНОВЫЕ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫЕ ЛЬДЫ В ЗАСОЛЕННЫХ МОРСКИХ
ОТЛОЖЕНИЯХ ПОБЕРЕЖИЙ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА
(ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ)

А.В. Гаврилов, Е.И. Пижанкова

Морозобойное растрескивание и формирование повторно-жильных льдов (ПЖЛ) в засоленных отложениях арктического шельфа до сих пор не рассматривалось никем, за исключением авторов [Гаврилов, Пижанкова, 2023]. Целью исследований является установление закономерностей развития этих процессов и явлений в пределах шельфа, которые всесторонне изучены, но только в пределах суши. Актуальность исследований важна в теоретическом отношении и тесно связана с реализацией государственной политики РФ, включая планы модернизации функционирования Северного морского пути, разведки и освоения минерально-ресурсного потенциала арктического шельфа, обеспечение национальной безопасности на период до 2035 г.

Основные факторы, определяющие развитие морозобойного растрескивания, рассмотрены ранее [Гаврилов, Пижанкова, 2023]. Отмечена важная роль в растрескивании объемно-градиентных напряжений, вызываемых колебаниями температур в верхних горизонтах пород, их состава и свойств [Достовалов, 1952; 1960], представлений о мерзлых породах как о вязкоупругом массиве и о скорости охлаждения, которое характеризует влияние времени на растрескивание [Lachenbruch, 1962]. В исследованиях Гречищева С.Е. [1970; 1973] учитывается снижение прочности пород во времени и релаксация напряжений. По мнению этого автора сезонные колебания температур приводят к напряжениям, равным пределу длительной прочности на разрыв, а разрушение породы и зарождение трещин осуществляется за счет короткопериодных – суточных («вторичных») резких понижений зимних температур. В работе Романовского Н.Н. [1977] морозобойное растрескивание и образование полигонально-жильных структур рассмотрены в связи со среднемноголетней температурой пород, амплитудой годовых колебаний температур на поверхности пород, мощностью слоев сезонного оттаивания и промерзания и теплофизическими свойствами пород, т.е. с типами сезонного оттаивания и промерзания пород по Кудрявцеву В.А. [1959]. Одними из основных типов полигонально-жильных структур являются повторно-жильные льды. Согласно этой классификации, чем ниже температура, выше ее годовая амплитуда, дисперснее состав и выше влажность отложений, тем интенсивнее повторяемость трещинообразования и глубина проникновения трещин. Северный вариант растрескивания по Романовскому Н.Н., сопровождающийся проникновением трещины непосредственно в мерзлую толщу и образованием в ней льда, в пылеватых суглинках и супесях обеспечивается среднемноголетними температурами пород от $-2...-3^{\circ}\text{C}$ и ниже. В пресных песках подобная возможность реализуется при температурах -5°C и ниже; в пресных

малольдистых гравийно-галечных (дресвяно-щебнистых) отложениях – при температурах не выше $-8\dots-9^{\circ}\text{C}$.

Важные данные о роли засоления в морозобойном растрескивании пород и формировании ПЖЛ получены в исследованиях Зайцева В.Н. [1975; 1976]. Для заторфованных тонкодисперсных осадков морской голоценовой террасы в районе низовий рек Колыма и Б. Чукочья, где засоление осадков и льдов достигает 2% и 4,5 г/л соответственно, Зайцевым В.Н. выявлено, что для образования ПЖЛ необходимы температуры пород около $-10\dots-11^{\circ}\text{C}$. Это на $7-9^{\circ}\text{C}$ ниже, чем в пресных отложениях аналогичного состава. По размеру полигональной решетки (50-100 м) на поверхности изображение этих льдов на детальном космоснимке существенно отличаются от ПЖЛ в пресных отложениях (10-25 м).

Материалы. Для исследований использовалось глобальное покрытие World Imagery, созданное по космическим снимкам (КС) с пространственным разрешением в панхроматическом варианте 0,3–1,7 м, полученным со спутников GeoEye, WorldView-2,4 за последние годы (2010–2020) с привлечением картографических, литературных данных и метеорологических обобщений.

Методика. Методика исследований базируется на использовании трех видов данных: теоретических основ морозобойного растрескивания и формирования ПЖЛ (1); указанных космических данных (2); опорных наземных данных (3). Высокое разрешение покрытия World Imagery дает возможность прямого дешифрирования участков полигонального микрорельефа (ПМР) на морских террасах, барах, в лагунах и проч. Среди опорных данных ключевое значение имеют упомянутый выше комплекс сведений по голоценовой морской террасе в низовьях рек Колыма и Б. Чукочья. Он дает возможность установить, что ПМР голоценовых форм рельефа арктического шельфа является индикатором ПЖЛ, а не всех полигонально-жильных структур, к которым, помимо ПЖЛ, относятся первично-песчаные жилы и псевдоморфозы по ПЖЛ.

Использование ПМР в качестве дешифровочного признака фаций прибрежно-морского осадконакопления позволяет выделять их типы, где ПЖЛ и полигональный микрорельеф являются одними из комплекса составляющих их параметров. В качестве теоретических основ в методических целях используется подход Романовского Н.Н. [1977], поскольку он предоставляет возможность картографирования как ПЖЛ, так и типов фаций прибрежно-морского осадконакопления, осуществляемого в связи с температурными условиями.

Результаты изучения и обсуждение. Изучено: распространение ПЖЛ и выделены фации прибрежно-морского осадконакопления, сопровождающегося промерзанием формирующихся отложений и образованием повторно-жильных льдов.

Распространение ПЖЛ. Составлена схематическая карта участков распространения синкриогенных прибрежно-морских отложений, формирующихся в условиях морозобойного

растрескивания и образования ПЖЛ. Она показывает достаточно широкое распространение ПЖЛ только на евразийском арктическом шельфе и почти полное их отсутствие на северо-американском шельфе. На северо-американском шельфе среднегодовая температура воздуха [Атлас..., 1980] составляет -12°C севернее Аляски и в канадской части моря Бофорта, до $-16\dots-18^{\circ}\text{C}$ в проливах Канадского арктического архипелага. Весьма значительны годовые амплитуды – с 30 до 40°C . Однако морозобойные трещины (только трещины, без ПЖЛ, с расстоянием $40-50$ м между ними) отмечены лишь на самом севере – на мысе Барроу. В западной части евразийского сектора (север Карского побережья Новой Земли) существенно теплее – минус $8-9^{\circ}\text{C}$, амплитуды меньше – 24°C (на $10-12^{\circ}\text{C}$ меньше значений у м. Барроу), а полигональный рельеф выше полосы плавника (границы волнения) в средней и тыловой частях I морской террасы прекрасно выражен. На Аляске нет прибрежно-морских террас, береговые бары в основном узкие. Кроме мыса Барроу и некоторых расширений баров, северо-американские берега лишены полосы плавника, фиксирующего границу приобья. Большую роль в генезисе играет волнение, а также деятельность морского льда, поставляющие материал со значительным участием обломочных отложений крупной размерности. Оба эти фактора не создают условий для накопления тонкодисперсных осадков, необходимых для формирования ледяных жил.

В отношении подверженности морозобойному растрескиванию, все разновидности пород в порядке ее ослабления располагаются в следующей последовательности: торф → сильно влажные оторфованные пылеватые супеси и суглинки → слабо влажные супеси и суглинки → песок → дресвяно-щебнистые и гравийно-галечные отложения [Романовский, 1977; Зайцев, 1976]. Состав и влажность пород при использовании КС в исследованиях относятся к числу прогнозируемых параметров (по результатам интерпретации).

Фации прибрежно-морского осадконакопления, сопровождающегося промерзанием формирующихся отложений и образованием повторно-жильных льдов. Прибрежно-морские аккумулятивные уровни в районе ключевого участка (низовья рек Колыма и Б. Чукочь) состоят из современной нижней формирующейся террасы, средней и верхней позднеголоценовых террас. ПЖЛ развиты на средней (в отдельных местах) и существенно шире – на высокой террасе. В составе отложений слоя сезонного оттаивания верхнего уровня в тыловой части террасы развиты торф, подстилаемый оторфованной супесью, с объемной влажностью 75% , в центральной части – оторфованная супесь с влажностью 43% [Зайцев, Кузнецова, 1976]. Размер полигональной решетки в тыловой части террасы при среднегодовой температуре пород $-10,3^{\circ}\text{C}$ составляет $70-75 \times 35-45$ м, в центральной при температуре $-10,8^{\circ}\text{C}$ – $70-80$ и $100-110$ м. Данные ключевого участка дают возможность предположить, что ПЖЛ на участках голоценовой аккумуляции формируются скорее всего только в весьма благоприятных условиях. Это, видимо, оторфованные пылеватые супеси и суглинки. Указанное обстоятельство объясняет фациальную

приуроченность ПЖЛ, весьма разреженное развитие этих льдов на арктическом шельфе, а также различия в их распространении на евразийском и северо-американском шельфах.

Выделены виды фаций (или криофаций) накопления синкриогенных прибрежно-морских отложений, сопровождающихся образованием ПЖЛ. В фациальном отношении наиболее широко ПЖЛ представлены в формирующихся лагунных отложениях. Многочисленные случаи наличия трещин даже на дне лагун свидетельствует о крайне мелководных условиях и о смерзании припая с донными осадками. Трещины, возможно, образуются ежегодно, а не только когда ледостав приходится на время ветрового сгона. Весьма многочисленны ПЖЛ выше линии заплеска волн в центральных и тыловых частях современной формирующейся прибрежно-морской террасы на севере Карского побережья о. Северный архипелага Новая Земля, несмотря высокие среднегодовые температуры воздуха ($-8...-10^{\circ}\text{C}$) и незначительные их амплитуды ($23-24^{\circ}\text{C}$).

Весьма ослабленная гидродинамика свойственна лагунам, часто теряющим связь с морем и превращающимся в озера, и эстуариям, характерным для побережий арктических морей высокоширотной Российской Арктики формирующим *бассейновые фации*. Трансформация лагуны в озеро повышает глубину бассейна, обнажая сформировавшийся ПМР в субаквальной обстановке (например, о. Тройной в архипелаге Известий ЦИК, Карское море).

Относительно широко распространена *фация береговых валов (баров)*. На западном берегу залива Буор-Хая моря Лаптевых системы береговых валов, перекрывшие лагуны (озера Гаврил-Кюэле и Хабырыс-Кюэле), исследовались наземными методами (Правкин и др., 2019). Валы высотой в 3-4 м датированы: 4; 3,2 и 1 тыс. лет назад. Высота валов показывает, что современное повышение уровня моря, скорее всего, существенно ниже повышения в суббореальное потепление и потепление викингов.

Фация нагонных заливов выделяется на восточном побережье моря Лаптевых. По этому признаку нагонный залив выявляется на берегу Эбеляхской губы (район устьев рек Суруктах – Урюнг-Хастах).

Фация прибрежно-морских террас развита на полуостровах Меркушина Стрелка и Лопатка (побережье Восточно-Сибирского моря). Это II прибрежно-морская терраса, датированная в 4 тыс. л.н. [Башлавин, Овандер, 1982]. Размер полигональной решетки 40-60 м. Соответственно, поровая влага здесь является солоноватоводной. I терраса является формирующейся в настоящее время. Существует масса соленых озер изменяющейся конфигурации. Полигональный микрорельеф, как и на современных лайдах, здесь не выражен.

Выводы

1. Выяснено, что арктическому шельфу от архипелага Новая Земля до о. Врангеля, несмотря на существенную океанизацию климата, свойственны условия для развития процессов

криогенного растрескивания засоленных прибрежно-морских отложений и формирования повторно-жильных льдов.

2. В соответствии со среднемноголетними температурами воздуха и годовыми амплитудами температур зона возможного развития ПЖЛ достаточно обширна. Но фациальные условия полигонально-жильного льдообразования весьма избирательны. Это участки лагунного осадконакопления, системы береговых баров, нагонные заливы, средние части и тыловые швы прибрежно-морских террас.

3. Северо-Американский шельф, кроме мыса Барроу, свободен от ПЖЛ. Прибрежно-морские отложения шельфа Аляски характеризуются недостаточной дисперсностью, а остальное побережье – это область ледниковой денудации и аккумуляции.

4. Выявление и картирование растрескивания и участков развития ПЖЛ следует осуществлять с помощью детальных космических снимков субметрового разрешения. Они обладают способностью отображать различные виды полигонального микрорельефа, фациальных условий формирования синкриогенных осадков и парагенетически связанных с ними повторно-жильных льдов.

Литература

1. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Л., 1980.
2. Башлавин Д.К., Овандер М.Г. О строении побережья западной части Восточно-Сибирского моря // Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет. М.: Наука, 1982, с. 174-178.
3. Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И. Морфолитогенез и образование повторно-жильных льдов на шельфе арктических морей (по космическим данным) // XII Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование» MARESEDU. 23-27 октября 2023г. Т.IV, с. 219-223.
4. Гречищев С.Е. К основам методики прогноза температурных напряжений и деформаций в мерзлых грунтах. М., 1970.
5. Гречищев С.Е. Основные закономерности термореологии и температурного растрескивания мерзлых грунтов // II Международная конф. по мерзлотовед., Якутск, 1973, Вып. 4.
6. Достовалов Б.Н. О физических условиях образования морозобойных трещин и развития трещинных льдов рыхлых пород // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике, вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1952, с. 162-194.
7. Достовалов Б.Н. Закономерности развития тетрагональных систем ледяных и грунтовых жил в дисперсных породах // Перигляциальные явления на территории СССР. М., Изд-во МГУ, 1960, с. 37-65.

8. Зайцев В.Н. Закономерности формирования мерзлотно-геологических условий и особенности современного повторно-жильного льдообразования на территории приморских низменностей Якутии. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., Изд-во МГУ, 1976, 25 с.
9. Зайцев В.Н., Кузнецова И.Л. Геокриологические условия северной части Колымской низменности (медуречье рек Бол. Чукеочьей и Коньковой) // Труды ПНИИИС, вып. 36. Геокриологические исследования при инженерных изысканиях. М., Стройиздат, 1975, с. 74-84.
10. Кудрявцев В.А. О сезонном промерзании и оттаивании почвы // Материалы по общему мерзлотоведению. VII Междугосударственное совещание по мерзлотоведению. М., Изд-во АН СССР, 1959.
11. Правкин С.А., Зандер Л., Папенмайер С., Михаэлис Р., Христофоров И.И., Данилов К.П., Большакина О.Д., Большакин Д.Ю. 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.
12. Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, Наука, 1977, 215 с.
13. Lachenbruch A. Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. Geol. Soc. Amer., 1962.
14. <https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>

МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ДИНАМИКИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ЯНО-ИНДИГИРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

Е.И. Пижанкова, А.В. Гаврилов

Анализ пространственных закономерностей распространения термокарстовых озер в настоящее время является весьма актуальной задачей, поскольку многие исследователи, исходя из определения площади озер по космическим снимкам, пытаются определить их вклад в эмиссию парниковых газов в атмосферу. Исследования динамики площадей термокарстовых озер производились многими исследователями в связи с представлениями о том, что эти озера будут реагировать на глобальные изменения климата и их площадь, вследствие этого, будет меняться. В ряде работ была проанализирована взаимосвязь с динамикой озёр таких факторов, как атмосферные осадки и эрозионная деятельность рек; отмечалось также, что наблюдается как увеличение площади и количества озёр, так и их уменьшение. Некоторыми исследователями [Викторов и др., 2023, Полищук и др., 2017] производится статистический анализ площадей и количества озер, однако особенности пространственных закономерностей их распределения авторами не учитываются.

Важные исследования в этом плане выполнены Веремеевой А.А. для Колымской низменности [Веремеева, Глушкова, 2016], в результате которых вслед за авторами [Тарасенко и др., 2013], показана роль новейшей тектоники в заозёрности территории.

Район исследований относится к Яно-Колымскому геокриологическому региону и расположен на севере Яно-Индигирской приморской низменности Якутии.

Климат территории определяется ее высокоширотным положением и близостью моря. По данным ближайшей метеостанции Чокурдах [www.pogodaiklimat.ru/history/21946.htm] среднегодовая температура воздуха в 2023 г. составила $-11,7^{\circ}\text{C}$, а количество осадков 148 мм/год. В XX столетии среднемноголетняя температура составляла $-14,1^{\circ}\text{C}$, количество осадков – 217,1 мм/год, что говорит о существенном потеплении, но снижении количества осадков. Геокриологические условия характеризуются сплошным распространением достаточно мощных мерзлых пород (300-500 м) с температурами от -9 до -13°C и ниже.

В тектоническом отношении территория представляет собой эпимезозойскую платформу. На основной её части рельефообразующими являются отложения позднеплейстоценового ледового комплекса (ЛК) мощностью до 40–50 м и отложения термокарстовых котловин (аласов) – голоценовый аласный комплекс (АК) мощностью 7-15 м. Объёмная льдистость ледового комплекса достигает 70-90 %, аласного комплекса – 50-70 %. На западе территории на поверхность выходят мезозойские магматические породы, слагающие островные горы с абсолютными высотами, изменяющимися от 130 до 533 м и относительными 100–300 м.

Термокарстом называется процесс вытаявания подземных льдов или оттаивания сильно льдистых отложений, сопровождающийся просадками земной поверхности с появлением отрицательных форм рельефа. Термокарстовые озера можно разделить на две генетические группы: первично- и вторично-термокарстовые. Первично-термокарстовые озера образуются при протаивании высокольдистых пород ледового комплекса. Вторично-термокарстовые озера возникают при протаивании современных подземных льдов в днищах аласов. Кроме этого существуют остаточные озера, приуроченные как к прибортовым, так и другим участкам в пределах аласов.

Данные Т.Н. Каплиной [2009], полученные по результатам более 100 радиоуглеродных датировок из верхних слоев ЛК и из АК на территории Северной Якутии, показали, что прекращение накопления ЛК и начало озерного термокарста и образования аласов совпадают во времени и относятся к диапазону примерно 13–12 тыс. лет назад. Этому времени соответствует фундаментальная перестройка природных условий и ландшафтов – от “тундростепей” до влажных кустарниковых тундр (на севере низменностей и арктических островах). Процесс озерного термокарста прошел достаточно быстро, и уже 11–10 тыс. лет назад в некоторых аласах накопление озерных отложений сменилось накоплением торфяников. К рубежу 10–8,5 тыс. лет назад аласный рельеф был сформирован. Причиной массового появления озер и прохождения по территории “волны” термокарста явилось в первую очередь изменение водного баланса – от дефицитного к избыточному. Анализ аэрокосмических снимков территории исследований показывает, что подавляющее большинство озер в аласах являются остаточными. По представлениям Т.Н. Каплиной [2009] рельеф приморских низменностей находится в настоящее время в состоянии, близком к равновесному, и термокарст в регионе не развивается, а расширение площади озер связано с термоабразией. Термоэрозионная деятельность водотоков приводит к спуску озер и образованию аласов, сопровождающемуся морозобойным растрескиванием и многолетним инъекционным пучением.

Для развития термокарста рубежа плейстоцена и голоцена наиболее важными представляются следующие положения [Каплина, 1987, 2009].

- Существенно повысились температуры воздуха зимнего периода, что фиксируется по изменению изотопно-кислородного состава голоценовых ледяных жил, современных жилок и текстурообразующих льдов [Деревягин и др., 2003].
- За счет увеличения облачности сократилась солнечная инсоляция и уменьшилось испарение.
- В сумме среднегодовые температуры воздуха повысились.
- Значительно увеличилось количество летних и зимних осадков.
- В результате водный баланс территории из дефицитного превратился в избыточный.

- Вместо разреженного травяного напочвенного покрова возник тундровый – влажный, с преобладанием мхов и полукустарничков (понижающий температуры пород на несколько градусов и существенно уменьшающий глубину сезонного оттаивания).

- Прежде сухие плотные грунты сезонноталого слоя превратились во влажные и даже переувлажненные, утратившие несущую способность, что стало одним из факторов, способствующих вымиранию мамонтовой фауны.

При настоящих исследованиях учитывалось, что наилучшие условия для стока воды существуют, если территория испытывает тектоническое поднятие, а на опускающихся участках сток затруднён. Поэтому изучение и картографирование морфоструктур, обусловленных новейшими тектоническими движениями, объясняет поражённость термокарстом различных участков исследуемой территории.

Исследования строились на базе анализа топографических карт масштаба от 1:1 000 000 до 1:200 000, космических снимков (КС) Landsat 7, 8 ETM+ 1999-2001 гг., 2013, 2018, Landsat 9 OLE 2023 г., аэрофотоснимков (АФС) 1951 г., цифровой модели рельефа (ЦМР) по данным ASTER, геологических и тектонических карт и схем. Для изучения морфологии поверхности ЛК и АК и криогенных явлений использовались космоснимки субметрового пространственного разрешения GeoEye-1, образующие глобальное покрытие [<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>].

Основными критериями морфоструктурного подразделения территории явились площадные соотношения останцов ЛК и аласов. Районирование контролировалось и дополнялось такими показателями, как продольный уклон русел однопорядковых рек, коэффициент извилистости рек, густота горизонтального расчленения, плановый рисунок речной сети и др.

На рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена прогрессивное развитие озерный термокарст получал только там, где дренаж поверхности был затруднен. Такими участками являлись отрицательные морфоструктуры. В пределах положительных морфоструктур возникавшие термокарстовые озера дренировались и термокарст затухал. Эти же факторы являются определяющими и в настоящее время.

В результате анализа рельефа и характера заозеренности территории было выделено несколько типов морфоструктур. Положительные морфоструктуры оказались представлены двумя основными типами. Первый – горстово-купольные структуры островных гор на магматических породах с прилегающей едомной равниной, вовлеченной в поднятие (П-1), второй – аккумулятивные равнины, сложенные ЛК, частично измененные термокарстом (П-2). Эти структуры являются активными поднимающимися морфоструктурами.

Отрицательные морфоструктуры плейстоцена и голоцена оказались представленными двумя основными типами. Тип О-1 – это морфоструктуры с явно выраженной тенденцией к современному опусканию. К типу О-2 относятся позднеоплейстоценовые отрицательные

морфоструктуры, унаследованно развивавшиеся в голоцене, однако признаков современного опускания в их строении не выявляется. Морфологически оба типа выражены аласными равнинами. Но первый из этих типов отличается существенно меньшим количеством останцов ЛК и выраженными гидрографическими признаками современного опускания. К отрицательным морфоструктурам приурочено преобладающее число озер. Здесь же находится и наибольшее количество крупных озер (площадью более 10 га). На положительных морфоструктурах озер существенно меньше и почти все они – малые.

В настоящее время для озер как больших, так и средних характерно увеличение площади за счет термоабразии берегов. Установлено, что для положительных морфоструктур средняя скорость отступления берегов за период 73 года (с 1951 по 2023 гг.) не превышает 0,4 м/год, а для отрицательных и стабильных составляет 0,6-1,1 м/год.

Процесс термоэрозии, связанный с деятельностью водотоков различного порядка приводит к спуску озер и дальнейшему образованию аласов, развитию процессов морозобойного растрескивания с образованием ПЖЛ и реке – пучения.

Анализ КС за различные даты в пределах одного года (например, середина июня и середина августа 2013 г.) показал существенную разницу площадей озер в связи с их глубиной. Площадь достаточно глубоких озер практически не меняется за исключением некоторых мелководных и прибрежных участков (например, оз. Бустах). Если глубина озера в целом невелика, то в конце летнего сезона (середина августа) наблюдается изменение конфигурации озера (например, оз. Солунтах) в сторону уменьшения площади водной поверхности за счет обнажения новообразованных мерзлых пород, фиксирующихся по буграм пучения и полигональному микрорельефу в прибрежной зоне, дешифрируемых с использованием детальных КС. Изображение озера, полученное 15.08.2023, показало уменьшение площади водной поверхности на 20 км² (с 104,3 км² в 2013 г. до 84,3 км² в 2023 г.) за счет прироста новообразованных ММП.

Важным результатом изучения динамики берегов по разновременным дистанционным данным было сравнение динамики берегов озер и морских берегов Яно-Индибирской низменности (западного и северного). Измерительное дешифрирование показало, что наибольшие изменения морских берегов связаны с их размывом, увеличившимся в XXI веке на различных участках в 1,4 раза – с 1,2-4,5 м/год до 1,7-6,2 м/год. Сравнение этих данных с динамикой берегов озер показало как в том, так и в другом случае рост скоростей отступления в XXI веке, несмотря на значительно меньшие (на порядок) скорости термоабразии для берегов озер.

Выводы

1. Для выделения локальных морфоструктур в областях распространения ледового комплекса осуществлен подход, базирующийся на генетической связи озерного термокарста по

ЛК с отрицательными морфоструктурами, который получил развитие на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена. Это подход реализован для северной части Яно-Индибирской низменности.

2. Морфологическим выражением отрицательных морфоструктур являются аласные равнины, выражением положительных морфоструктур – едомные равнины, сложенные породами ледового комплекса.

3. Проведенные исследования показали, что озерам, расположенным в пределах положительных морфоструктур, свойственно незначительное увеличение площади, в отрицательных - более значительное, а также спуск озер с формированием аласов, дальнейшим их промерзанием с морозобойным растрескиванием и пучением.

4. Любым расчетам, связанным с озерным термокарстом, должно предшествовать морфоструктурное или ландшафтное районирование, позволяющее выявить особенности площадного распространения ЛК, АК и озер.

5. Для изучения многолетней динамики озер необходимо использование разновременных КС за близкие сезонные даты, а также изучение разносезонных КС в пределах одного года, позволяющее выявить внутригодовую динамику и сопутствующие процессы (термоабразию, термоэрозию, морозобойное растрескивание, пучение).

Литература

1. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В. Сравнительный анализ распределений эрозионно-термокарстовых равнин // Криосфера Земли. 2023. Т. XXVII, № 2, с. 55-64.

2. Веремеева А.А., Глушкова Н.В. Формирование рельефа в районах распространения отложений ледового комплекса в тундрах Колымской низменности (по данным космической съемки // *Криосфера Земли*, 2016, т. XX, № 1, с. 15–25.

3. Тарасенко Т.В., Кравцова В.И., Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И. Изучение динамики термокарстовых озер приморской низменности Якутии в связи с морфоструктурным планом территории // «Земля из космоса – наиболее эффективные решения», шестая международная конференция 2-4 октября 2013 г./Сборник тезисов.- М., Инженерно-технологический Центр СканЭкс, НП «Прозрачный мир», 2013, с. 303-309.

4. Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х. Изотопный состав природных вод и современных подземных льдов Лаптевоморского региона // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 41-48.

5. Каплина Т.Н. Закономерности развития криогенеза в позднем кайнозое на аккумулятивных равнинах северо-востока Азии. Автореф. дисс... докт.геол.-мин. наук, Якутск, 1987, 41 с.

6. Каплина Т.Н. Аласные комплексы северной Якутии // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 3-17.

7. Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Муратов И.Н., Полищук В.Ю. Изучение распределения малых озер по размерам в прерывистой криолитозоне Западной Сибири по снимкам Канопус-В //Криосфера Земли, 2017, Том XXI, № 2, с. 80-87.

8. <http://www.pogodaiklimat.ru/history/21946.htm>

ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫЕ ЛЬДЫ НА ПРИМОРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ АНАБАРО-ОЛЕНЕКСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

А. Ю. Деревягин

Криогенное строение Приморской низменности Анабаро – Оленекского междуречья мало изучено. Первые данные об ископаемых льдах к югу от Кряжа Прончищева были опубликованы в 60-х годах (Боярский, Митт, 1961 а, б). Форма, состав, строение изученных льдов и их взаимоотношение с вмещающими отложениями позволили авторам отнести их к типу сингенетических повторно-жильных льдов (ПЖЛ), формировавшихся в условиях полигональной поймы. Период накопления осадков и формирования ПЖЛ охватывал значительную часть верхнечетвертичного времени (Боярский, Митт, 1961 б).

В 2003-2005 г.г были получены новые материалы по криогенному строению, возрасту и изотопному составу ПЖЛ и льдистых вмещающих отложений. Комплексные литологические и мерзлотные исследования проводились на участке мыс Мамонтовый Клык (рис. 1) силами российско-германской экспедиции. Лабораторные работы по определению изотопного состава подземных льдов ($\delta^{18}\text{O}$, δD) и возраста проводились в Германии.

Приморская низменность Анабаро – Оленекского междуречья занимает площадь около 3500 км². На севере она омывается водами моря Лаптевых. С юга, примерно в 30 км от берега, ограничена Кряжем Прончищева, сложенным песчаниками, алевролитами и конгломератами перми, триаса и юры (Жуков и др., 1968). Абсолютные отметки кряжа достигают 200-300 метров. Низменность представляет собой холмисто-увалистую пологую равнину с абсолютными отметками, повышающимися с севера на юг, от 25-30 до 55 м. и характеризуется широкими плоскими заболоченными водоразделами с полигональным микрорельефом и большим количеством термокарстовых озер (рис. 1).

С поверхности Приморская низменность сложена льдистыми породами голоцена и верхнеплейстоценового ледового комплекса (едомы), подстилаемыми толщей верхнеплейстоценовых песчаных отложений (рис.2).

27-метровый разрез льдистых отложений представлен трехслойной толщей, различающейся по своему геологическому и криогенному строению. Нижняя часть разреза песчаная (комплекс 1) вскрывается на высотах от 0 до 7 м над уровнем моря. Термолюминесцентный возраст комплекса от $31,8 \pm 4,3$ до $56,6 \pm 8,3$ тыс. лет. Ниже уровня моря песчаная толща вскрыта буровыми скважинами до глубины 50 м. Комплекс содержит несколько ярусов песчано-ледяных жил (ПЛЖ) и фрагменты первично песчаных жил. Весовая льдистость песчаных отложений достигает 20-40%.

Песчаный комплекс перекрыт толщей отложений ледового комплекса (едомы), представленного серыми оторфованными алевролитами, с мощными непрерывными по вертикали

ПЖЛ и характерными поясковыми криогенными текстурами (комплекс 2). Возраст отложений ледового комплекса лежит в диапазоне от 45870 до 9480±40 лет.

Сквозные повторно-жильные льды ледового комплекса пронизывают весь разрез берегового обнажения и выклиниваются на границе с нижележащими песками, а в некоторых случаях проникают своими хвостами под уровень моря. Жилы ледового комплекса заметно расширяются снизу вверх, достигая у поверхности ширины 3-5 метров. Общая весовая льдистость отложений ЛК достигает 70 более процентов. При оттаивании грунты имеют текучую консистенцию.

Голоценовые отложения (комплекс 3) располагаются на поверхности ЛК в виде крупных линз, заполняя неглубокие депрессии и долины мелких водотоков. Представлены песками, алевритами, с большим числом линз, карманов, включений торфа и растительных остатков. Возраст подошвы отложений согласно ¹⁴C анализу имеющихся образцов 9480±40 лет. Криотекстура отложений массивная, поясковая и линзовидная, весовая льдистость достигает 70-80%. Голоценовые ПЖЛ, расположены в 2-3 метровой приповерхностной части ледового комплекса (непосредственно ниже СТС мощностью 0,3-0,5 м). ПЖЛ внедряются в нижележащие верхнеплейстоценовые ПЖЛ, образуя с ними единые ледяные тела, но хорошо выделяются по более светлому, белому цвету льда, обусловленному меньшим содержанием минеральных частиц и обилию пузырьков воздуха. В ряде случаев голоценовые ПЖЛ имеют в своей верхней части узкие (несколько сантиметров) современные ростки.

Изотопный состав (кислород-18 и дейтерий) ПЖЛ участка «Мамонтовый Клык» определен более чем для 300 образцов. На рисунке 3 приведена диаграмма соотношения кислорода-18 и дейтерия в ПЖЛ соответствующее уравнения регрессии. Уравнение показывает, что изотопный состав льда достаточно близок к среднему изотопному составу атмосферных осадков в диапазоне изучаемых значений. Это позволяет использовать результаты изотопного анализа для палеотемпературной интерпретации. Наиболее низкие концентрации тяжелых изотопов (можно сказать, наиболее холодные условия формирования ПЖЛ) характерны для ледового комплекса, где значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют -28,5÷-34,9‰. Наиболее тяжелый изотопный состав отмечен в голоценовых ПЖЛ (-20,9 ÷ -26,6‰), а также в современных ростках ПЖЛ, где значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют -19÷-23‰.

В ряде образцов льда были обнаружены и датированы органические остатки. Изменения изотопного состава ПЖЛ за последние 40 тысяч лет, которые можно связывать с периодами более теплых и холодных зим (рис.4). Отмечается волнообразное течение изменений зимних температур в конце каргинского времени (40-25 тыс. лет назад) и более холодный период в сартанское время (25-10 тыс. лет назад). Четкий тренд потепления наблюдается в голоцене с выраженным похолоданием в районе 2,4 тыс. лет назад. Зафиксирован также перерыв в имеющихся датировках ПЖЛ (20,7 тыс. лет – 14,9 тыс. лет), который можно связать с приостановкой формирования ПЖЛ в это время. Эти результаты совпадают с данными, полученными для острова Собо Сисе в дельте Лены (Wetterich, 2020).

Приведенные данные, основанные на датировании органических включений в образцах льда ПЖЛ с известным изотопным составом позволили построить примерную палеотемпературную кривую и могут служить предметом обсуждения и предварительных выводов о характере климатических изменений в данном регионе в переходный от плейстоцена к голоцену период и в голоцене.

Литература

Боярский О. Г., Митт К. Л. К вопросу о наличии форм рельефа ледниковой аккумуляции в тундре Анабаро-Оленекского междуречья. // Мерзлотные исследования вып. 1, Изд-во Московского Университета, 1961, с.145-154

Боярский О. Г., Митт К. Л. Новые данные об ископаемых льдах в тундре Анабаро-Оленекского междуречья. // Мерзлотные исследования вып. 1, Изд-во Московского Университета, 1961, с.154-162

Жуков В.В. и др. Кайнозойские алмазоносные россыпи Анабаро-Оленекского междуречья / В.В. Жуков, А.Ф. Горина, Л.Я. Пинчук. – Л.: Недра, 1968. – 144 с.

Wetterich S., Kizyakov A., Fritz M., Wolter J., Mollenhauer G., Meyer H., Fuchs M., Aksenov A., Matthes H., Schirrmeister L., and Opel Th. The cryostratigraphy of the Yedoma cliff of Sobo-Sise Island (Lena delta) reveals permafrost dynamics in the central Laptev Sea coastal region during the last 52 kyr// The Cryosphere, 14, 4525–4551, 2020, doi.org/10.5194/tc-14-4525-2020

Рисунки

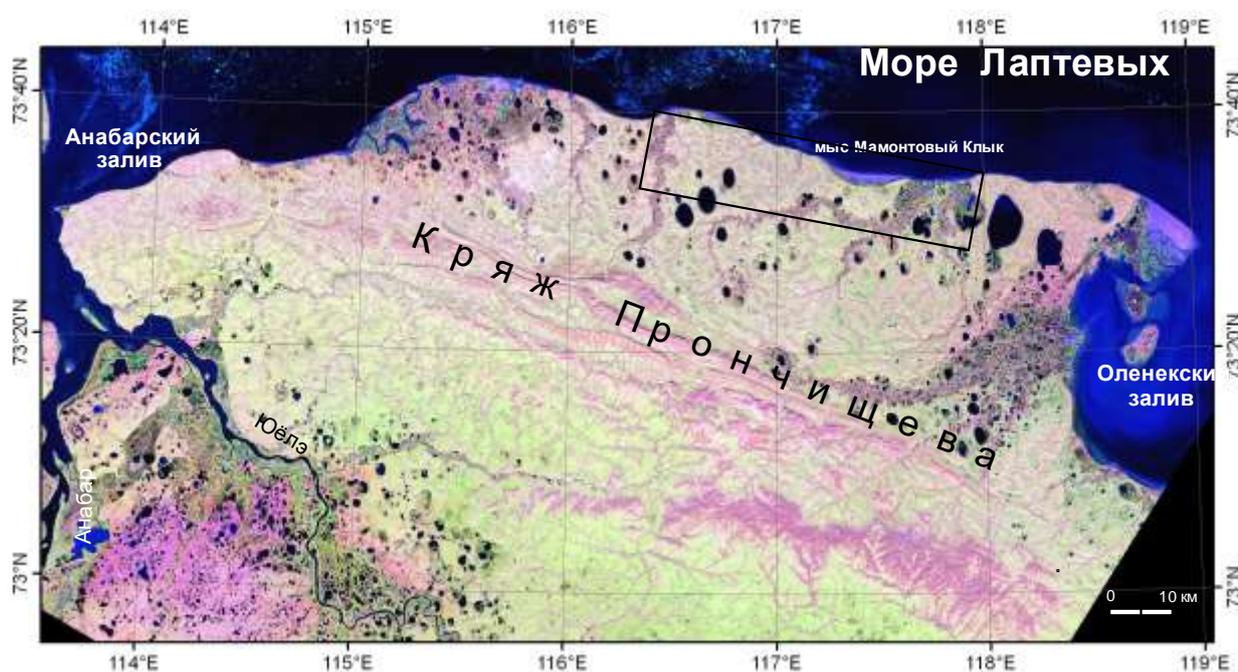


Рис. 1. Космический снимок Landsat-7 района работ



Рис.2. Поверхность верхнеплейстоценового ледового комплекса (едомы).

Изотопный состав верхнеплейстоценовых и голоценовых повторно-жидьных льдов. Участок Мамонтовый Клык.
 (GMWL –глобальная линия метеорных вод; в нижнем правом углу уравнение регрессии)

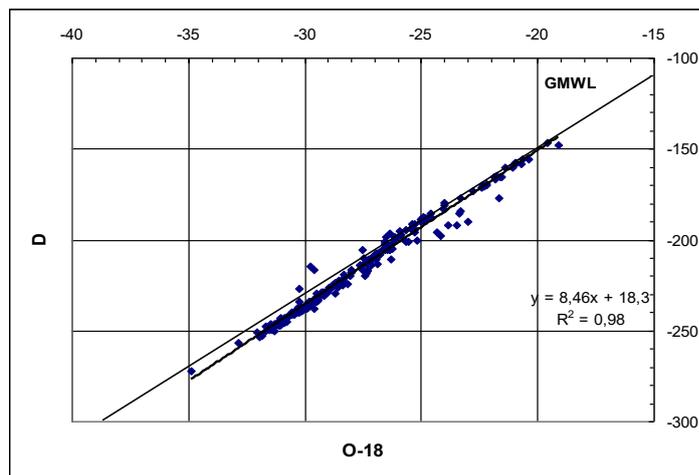


Рис.3. Диаграмма соотношения кислорода-18 и дейтерия в ПЖЛ диаграмма соотношения кислорода-18 и дейтерия в ПЖЛ

Изменения концентрации кислорода-18 (а) и эксцесса дейтерия (б) в повторно-жильных льдах участка мыс Мамонтовый Клык за последние 40 тысяч лет

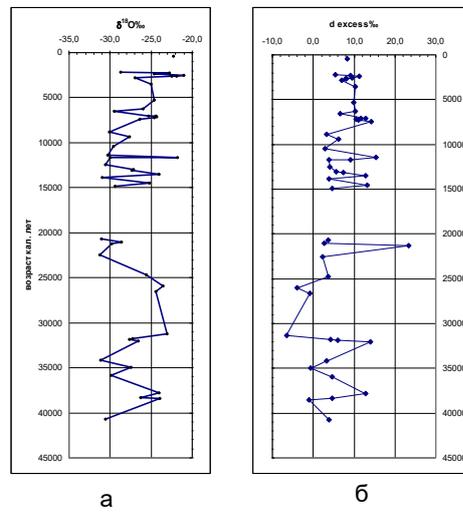


Рис. 4. . Изменения изотопного состава ПЖЛ за последние 40 тысяч лет,