

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ДАМБЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ АТМОСФЕРНЫМИ ВОДАМИ**

***Кристина Юрьевна Тулисова***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, аспирант, e-mail: TulisovaKY@ipgg.sbras.ru

***Татьяна Алексеевна Кулешова***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, e-mail: KuleshovaTA@ipgg.sbras.ru

***Алексей Михайлович Янников***

Институт «Якутнипроалмаз», Россия, 678174, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ленина, 39, к.г.-м.н., заведующий лабораторией, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru

***Наталья Викторовна Юркевич***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., заведующий лабораторией эколого-экономического моделирования техногенных систем, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

В статье приведены результаты проточного эксперимента, моделирующего процесс растворения грунтов основания дамбы гидротехнического сооружения грунтовыми водами. Объектом исследования является хвостохранилище обогатительной фабрики, за время эксплуатации которой произошло растепление многолетнемерзлых грунтов береговых примыканий ограждающей дамбы, зафиксированы утечки значительных объёмов оборотных вод в расположенную ниже манёвровую ёмкость. Развитие фильтрационных каналов в трещиноватых тектонических зонах, слагающих прибортовой горный массив, не прекращается. По завершению эксперимента, который длился 20 недель, был получен массив измеренных показателей растворов на выходе из колонок: рН, удельная электропроводность и элементный состав. Полученные данные позволили оценить скорость растворения грунтов основания дамбы.

**Ключевые слова:** дамба, хвостохранилище, гидротехническое сооружение, растворение грунтов, кинетический эксперимент

## **MODELIND OF THE PROCESS OF DISSOLUTION OF SOILS IN THE BASE OF A HYDRAULIC STRUCTURE BY ATMOSPHERIC WATER**

***Kristina Y. Tulisova***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., PhD Student, e-mail: TulisovaKY@ipgg.sbras.ru

***Tatyana A. Kuleshova***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Researcher, e-mail: KuleshovaTA@ipgg.sbras.ru

***Alexey M. Yannikov***

Institute "Yakutnioproalmaz", Russia, 678174, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Lenin st., 39, Cand. Sc., Senior Researcher, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru

*Nataliya V. Yurkevich*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Cand. Sc., Head of lab, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of a flow-through experiment simulating the process of dissolution of soils of the foundation of a dam of a hydraulic structure by groundwater. The object of the study is the tailing dump of the concentrating plant, during the operation of which the permafrost soils of the coastal abutments of the enclosing dam thawed, significant volumes of circulating water leaked into the shunting tank located below. The development of filtration channels in fractured tectonic zones that make up the near-rock massif does not stop. Upon completion of the experiment, which lasted 20 weeks, an array of measured parameters of solutions at the exit from the columns was obtained: pH, specific conductivity and elemental composition. The data obtained made it possible to estimate the rate of dissolution of the soils of the dam foundation.

**Keywords:** dam, tailing dump, hydraulic structure, soil dissolution, kinetic experiment

### *Введение*

Проблема складирования отходов горнорудного производства в криолитозоне стоит особо остро, что связано с деградацией вечной мерзлоты в результате техногенного растепления. В настоящее время в районах добычи твёрдых полезных ископаемых (Россия, Китай, Канада и др.) складированы миллионы кубометров промышленных отходов и пустой породы. В криолитозоне проблема складирования отходов обостряется за счет слабости экосистемы, водоупорных свойств мерзлых пород, развития деструктивных криогенных процессов [1, 2]. Ситуация осложняется трендами к потеплению климата, что особенно актуально для регионов, где в законсервированном (замороженном) состоянии хранятся несколько сотен миллионов кубометров отходов [3, 4]. Кроме того, процессы взаимодействия воды с отходами в условиях Крайнего Севера зачастую приводят к растеплению многолетнемерзлых грунтов, формированию техногенных таликов, утечкам техногенных вод, что в случае наличия разломных зон приводит к развитию фильтрационных каналов [5].

Исследуемый объект расположен в Западной Якутии. Хвостохранилище (ХХ) обогатительной фабрики алмазодобывающего предприятия введено в эксплуатацию в 1996 году, является гидротехническим сооружением I класса капитальности, по месту расположения – балочным, по способу заполнения – намывным. Емкость хвостохранилища при конечном уровне 605 м составляет 230,2 млн м<sup>3</sup>. За время эксплуатации ХХ произошло растепление многолетнемерзлых грунтов береговых примыканий ограждающей дамбы как по левому, так и по правому борту ХХ, через которые, начиная с 2000-2001 годов, зафиксированы утечки значительных объёмов оборотных вод в расположенную ниже манёвровую ёмкость. Развитие фильтрационных каналов в трещиноватых тектонических зонах, слагающих прибортовой горный массив, не прекращается [6].

Целью работы является оценка скорости растворения пород основания дамбы хвостохранилища.

## Методы

В ходе работы экспедиционного отряда были отобраны пробы керн из скважин на территории ХХ.

Для эксперимента были взяты пробы из всех шести скважин. Образцы грунтов представлены тремя типами пород (известняк, мергель и хвостовой материал).

Полученные пробы пород были раздроблены, тщательно гомогенизированы многократным перемешиванием, расквартованы. Характеристика геохимического состава пород проводилась на основании определения оксидов силикатной группы, примесных элементов, форм серы (общая, сульфидная, сульфатная) и  $\text{CO}_2$ .

Оценка скорости растворения грунтов основания дамбы в результате взаимодействия «вода-грунты» проводилась при помощи кинетических экспериментов.

Выбор проб для кинетических экспериментов был сделан, исходя из значений рН пасты, основного оксидного, микроэлементного и минералогического состава. Для получения объективной картины взаимодействия воды с грунтами основания дамбы ХХ ОФ № 14 отбирались мергели, известняки и хвостовые продукты как с низкими, так и с высокими значениями рН пасты и различными содержаниями пирита. Сделанный таким образом выбор проб для экспериментов обеспечил получение наиболее адекватной картины процессов растворения пород.

Условия экспериментов:

1. Использовались стандартные колонки размером 10 см (высота), 8 см (внешний диаметр) - 6.5 см (внутренний диаметр) (рис. 1).

2. Выщелачивание проводилось дистиллированной водой в атмосферных условиях.

3. Методика выщелачивания соответствует в общих положениях [7]:

а) образцы весом 0.3 кг загружаются в колонку;

б) заливается дистиллированная вода в количестве, достаточном для заполнения порового пространства (120 мл). Выдерживается 4 часа для растворения солей, присутствующих в пробе изначально (образовавшихся *in situ*);

в) сливается раствор, слив маркируется как проба «Неделя 0», определяется рН, УЭП, концентрации анионов (сульфат, карбонат, хлориды), основных катионов и металлов;

г) начинаются следующие двадцать недель.



Рис.1. Схема эксперимента

В каждой неделе образец продувался ежедневно сухим воздухом (Air Pump, Output 0.0098С.С./Min), на седьмой день производился смыв дистиллятом в объеме 50 мл и определялись все вышеуказанные характеристики раствора.

Ионный и микроэлементный состав растворов в каждой пробе определяли методом ICP-MS и капиллярного электрофореза.

### Результаты

Силикатный состав пород варьирует в широком диапазоне. Согласно данным опробования проанализированная коллекция представлена семью типами пород: известняками, мергелями, глинами, суглинками, супесями, псефитами и метаморфитом. Вертикальное распределение оксидов силикатной группы по скважинам очень неравномерно.

По данным анализа оксидов силикатной группы техногенные прослойки характеризуются накоплением  $SO_3$ ,  $MgO$ ,  $P_2O_5$ ,  $Fe$ ,  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $Ba$ , а промытые известняки – снижением концентраций наиболее подвижных при взаимодействии «вода-порода» химических элементов.

Рассмотрим динамику полученных данных спустя двадцать недель эксперимента на примере пробы 2/55 (известняк).

При взаимодействии с дистиллированной водой значения pH смывов образца повышается от ~7.5 в начале эксперимента до ~8.5 уже на третьей неделе (рис. 3). Значения УЭП смывов понижается с ~2500 мкСм/см до ~500 мкСм/см. На 3 неделе УЭП повышается до ~1250 мкСм/см, но на четвертой неделе снова снижается до ~500 мкСм/см и остается в диапазоне этого значения до конца эксперимента (рис. 2).

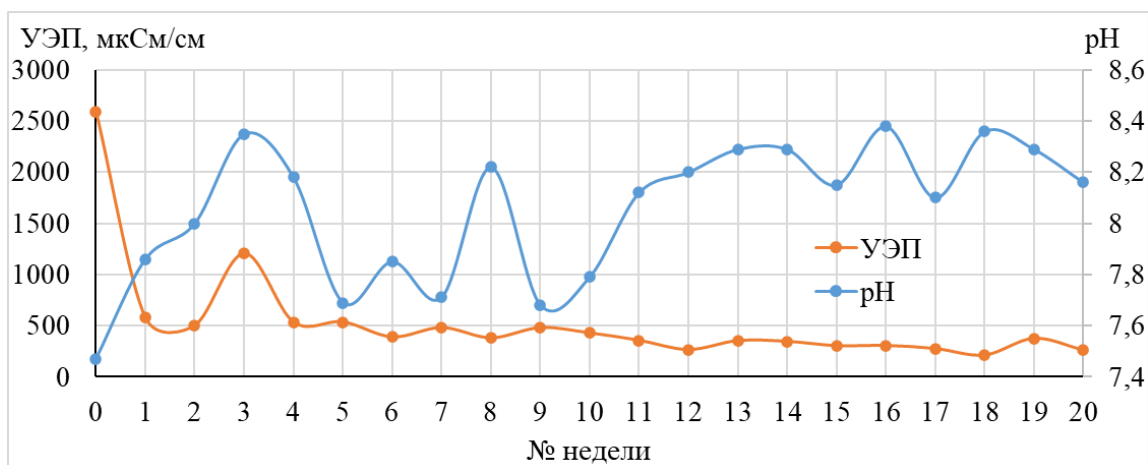


Рис. 2. Графики изменения значений pH и УЭП (проба 2/55)

После исследования динамики концентраций  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $K$  и  $Na$ , значений pH и удельной электропроводности в ходе динамического эксперимента были рассчитаны доли элементов, перешедших из грунтов в раствор (табл. 1).

Пробы из скважины №4 (4/11 и 4/25) соответствуют хвостовому материалу. Доли элементов, перешедших в раствор, в них выше, чем в остальных образцах: Na - 35.76 и 37.37 %, K 12.43 и 8.21% для проб 4/11 и 4/25 соответственно.

*Таблица 1*

Доли элементов (% от общего содержания в колонке),  
перешедших из грунтов в раствор

<i>Проба\Элемент</i>	<i>Ca, %</i>	<i>Mg, %</i>	<i>K, %</i>	<i>Na, %</i>
2/55	2.0	2.3	1.3	17
3/60	0.35	1.6	5.1	18
4/11	0.47	1.3	12	36
4/25	0.88	1.3	8.2	37
5/65	2.2	4.7	3.6	8.1
6/38	0.12	0.72	5.4	14

Результаты кинетических экспериментов с принудительной продувкой воздухом указывают на растворение около 0.1 % известняков (по кальцию). Если рассматривать реакции взаимодействия вода-порода в зоне фильтрации (активного тепло- и массопереноса) в право- и левобережном примыканиях, то по нашим оценкам процессам растворения подвергается 0.01 % известняков. В объёмной выражении, с учётом расхода обходной фильтрации это составляет порядка 250 м<sup>3</sup> известняка (по кальциту) в год. Плановое расположение растворяемого известняка сложно прогнозируемо и может быть принято равномерным в нижней трети пути массопереноса фильтрата (зона активного водо- массового обмена).

Взаимодействие известняков с водой в проточном режиме с принудительной продувкой воздухом приводит к растворению 0.38 % соединений кальция, 0.70 % магния, что на 2 порядка выше, чем в статичном варианте. Аналогичные оценки были сделаны для мергелей и хвостов. Хвосты являются поставщиками водорастворимых соединений серы (прежде всего, сульфат-ионов) и кальция (на том же уровне, что известняки).

*Исследование выполнено по программе ФНИ (проект № 0266-2019-0008).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шерстюков А. Б. Многолетняя мерзлота России в условиях глобального потепления климата // Проблемы региональной экологии. – 2007. – №. 4. – С. 6-10.
2. Гребенец В. И. и др. Проблема размещения отходов в арктических регионах России // Проблемы региональной экологии. – 2019. – №. 5.

3. Шевчук А. В. Вопросы развития Арктики и экологическая безопасность // Современные производительные силы. – 2015. – №. 3. – С. 59-73.
4. Данилов П. П. Почвенный покров пригородной зоны г. Мирного и воздействие на него Объектов алмазодобывающей промышленности: дис. – Улан-Удэ : [Ин-т прикл. экологии Севера АН Респ. Саха (Якутия)], 2005.
5. Гребенец В. И. Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2007. – №. 3. – С. 18-21.
6. Отчёт о НИР «Комплексное изучение целостности массива дамбы и ложа хвостохранилища геохимическими методами» – ИНГГ СО РАН. – Новосибирск. – 2020. – 130 с.
7. ASTM (2020) D3987-12: Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

## REFERENCES

1. SHerstyukov A. B. Mnogoletnyaya merzlota Rossii v usloviyah global'nogo potepeniya klimata // Problemy regional'noj ekologii. – 2007. – №. 4. – С. 6-10.
2. Grebenec V. I. i dr. Problema razmeshcheniya othodov v arkticheskikh regionah Rossii // Problemy regional'noj ekologii. – 2019. – №. 5.
3. SHEvchuk A. V. Voprosy razvitiya Arktiki i ekologicheskaya bezopasnost' // Sovremennye proizvoditel'nye sily. – 2015. – №. 3. – С. 59-73.
4. Danilov P. P. Pochvennyj pokrov prigorodnoj zony g. Mirnogo i vozdejstvie na nego Ob"ektovalmazodobyvayushchej promyshlennosti: dis. – Ulan-Ude : [In-t prikl. ekologii Severa AN Rесп. Saha (YAkutiya)], 2005.
5. Grebenec V. I. Negativnye posledstviya degradacii merzloty // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. – 2007. – №. 3. – С. 18-21.
6. Otchyot o NIR «Kompleksnoe izuchenie celostnosti massiva damby i lozha hvostohranilishcha geohimicheskimi metodami» – INGG SO RAN. – Novosibirsk. – 2020. – 130 s.
7. ASTM (2020) D3987-12: Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

© К. Ю. Тулисова, Т. А. Кулешова, А. М. Янников, Н. В. Юркевич, 2021