

ПОЧВОВЕДЕНИЕ/SOIL SCIENCE

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.98>

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА ТЕРМОГРАДИЕНТНОЙ МИГРАЦИИ ВЛАГИ В ГРУНТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО МАРКЕРА

Научная статья

Кравцов Ю.В.^{1,*}, Рыжих А.П.²¹ORCID : 0000-0002-0462-9194;²ORCID : 0000-0001-5326-2571;^{1,2} Новосибирский государственный педагогический университет, Новосибирск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kravtsov60[at]mail.ru)

Аннотация

В существующих моделях термоградиентного передвижения влаги в пористых средах не раскрываются граничные условия ее миграции в жидкой или парообразной форме.

Цель статьи — проверка возможности выявления механизма термоградиентной миграции влаги в грунтах с применением химического маркера.

В качестве маркера использовался хлорид-ион, в качестве грунта — насыпные колонки песка разной влажности. Движению влаги в жидком виде соответствует изменение распределения химического маркера, при миграции парообразной влаги распределение маркера остается неизменным. На предварительном этапе установлены профили влажности экспериментальных колонок, в котором отражается типичное для почвенно-грунтовых толщ с близким залеганием грунтовых вод распределение влаги в течение теплого сезона года. Для этого колонки снабжены отверстиями для контакта грунта с водой и помещены в емкость с солевым раствором. Спустя 9 суток в них определялась влажность (термостатно-весовым методом) и содержание маркера (методом Мора). На основном этапе колонки после установления профиля влажности дополнительно подверглись промораживанию сверху в течение 14 суток, затем в них определено распределение влажности и маркера.

Предварительные профили влажности и распределение хлорида оказались идентичными в колонках с разной исходной влажностью грунта (0% и 5,5% массы) и характеризовались сопоставимостью с летними профилями влажности почвенно-грунтовых толщ с близким залеганием грунтовых вод. Соответствие содержания влаги и хлорид-ионов в колонках подтверждает, что движение воды в парообразном состоянии в них практически отсутствует. В охлаждавшихся колонках при движении вглубь промерзшего слоя вслед за снижением прибавки влаги пропорционально уменьшается и прибавка содержания хлорида. Следовательно, при высокой влажности влага передвигалась преимущественно в жидком состоянии.

Примененный метод оценки механизма переноса влаги может быть использован в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: движение влаги, профиль влажности, промерзание грунтов, криогенная миграция, химический анализ, метод Мора.

DETECTION OF THE MECHANISM OF THERMOGRADIENT MOISTURE MIGRATION IN SOILS USING A CHEMICAL MARKER

Research article

Kravtsov Y.V.^{1,*}, Ryzhikh A.P.²¹ORCID : 0000-0002-0462-9194;²ORCID : 0000-0001-5326-2571;^{1,2} Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russian Federation

* Corresponding author (kravtsov60[at]mail.ru)

Abstract

The existing models of thermogradient movement of moisture in porous media do not disclose the boundary conditions of its migration in liquid or vapour form.

The aim of the article is to test the possibility of detecting the mechanism of thermogradient moisture migration in soils using a chemical marker.

Chloride ion was used as a marker, bulk pillars of sand of different moisture content were used as soil. The movement of moisture in liquid form corresponds to a change in the distribution of chemical marker, while during the migration of vapour moisture, the distribution of marker remains unchanged. At the preliminary stage, moisture profiles of experimental columns were established, which reflects the moisture distribution typical for soil cover with close groundwater occurrence during the warm season of the year. For this purpose, the pillars were equipped with holes for soil-water contact and placed in a tank with saline solution. After 9 days, moisture content (thermostat gravimetry method) and marker content (Mohr's method) were determined in them. At the main stage, after establishing the moisture profile, the pillars were additionally subjected to freezing from above for 14 days, and then moisture and marker distribution was determined in them.

Preliminary moisture profiles and chloride distribution appeared identical in columns with different initial soil moisture (0% and 5.5% of mass) and were characterised by comparability with summer moisture profiles of soil cover with close groundwater occurrence. The consistency of moisture and chloride ion content in the pillars confirms that water movement in the vapour state in them is practically absent. In the cooled pillars, when moving deep into the frozen layer, the decrease in the

moisture content is followed by a proportional decrease in the chloride content. Consequently, at high humidity, the moisture moved mainly in the liquid state.

The applied method for evaluating the moisture transfer mechanism can be used in further research.

Keywords: moisture movement, moisture profile, soil freezing, cryogenic migration, chemical analysis, Mohr's method.

Введение

Изучение водного режима сибирских степных почв, на которых возделываются преимущественно яровые зерновые культуры, по-прежнему остается актуальным. Одним из важных элементов водного режима почв является передвижение влаги по их профилю. Среди различных механизмов передвижения особая роль принадлежит миграции почвенной влаги под влиянием температурного градиента. Наиболее ярко такая миграция выражена при промерзании верхней части почвенно-грунтовой толщи, когда передвижение осуществляется из непромерзающих подпочвенных пород в сезонно-промерзающий слой. Попадая в слой с отрицательными температурами, мигрировавшая влага замерзает. Величина криогенной аккумуляции влаги может достигать 100 мм и более, что сопоставимо с запасами почвенной влаги для вегетации яровых зерновых культур. При больших объемах намерзшей влаги прогревание нижних горизонтов почв может задерживаться на 7–10 дней. Таким образом, термоградиентное передвижение влаги в сезонно-промерзающих степных почвах Сибири является важным элементом их водного режима.

Для прогноза термоградиентного движения влаги предпринимаются попытки математического моделирования этого явления. При большом количестве предложенных моделей [1], [2], [3], [4], [5], в них используются разные показатели, поэтому они отличаются только региональной применимостью [6], [7], [8], [9]. Помимо этого, в моделях практически не учитывается форма передвигающейся влаги. Из общих представлений о переносе воды в системе «твердое пористое тело — жидкость — газ» следует ожидать два основных способа: жидкий перенос и миграцию воды в парообразном состоянии. При высокой влажности почвенно-грунтовых толщ влага под влиянием температурного градиента перераспределяется преимущественно в жидком виде, в почвах с низкой влажностью — в виде водяного пара [10], [11]. Однако на вопросы о граничных условиях миграции различных форм влаги в почвах и в грунтах нет внятных ответов. Для получения ответов на такие вопросы необходимо проводить экспериментальные исследования по дифференциации потока влаги на жидкую и газообразную составляющие. Такая дифференциация возможна с применением химического маркера.

Целью статьи является проверка возможности выявления механизма термоградиентной миграции влаги в грунтах с применением химического маркера.

Методы и принципы исследования

В качестве основного постулата использовалось положение о том, что движению влаги в жидком виде соответствует изменение распределения растворенного химического маркера, а при движении парообразной влаги профильное распределение маркера остается неизменным. В качестве маркера применялся хлорид-ион (хлорид).

При исследовании использовались насыпные колонки песчаного грунта, отобранного из свежего аллювиального наноса в низкой пойме долины реки Обь. Гранулометрический состав грунта определен методом Качинского и отражен в таблице.

Таблица 1 - Гранулометрический состав песчаного грунта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.98.1>

Глубина , м	Потери от обработ ки HCl, %	Количество частиц, %, размер, мм						
		1–0,25	0,25– 0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,005	0,005– 0,001	<0,001	<0,01
0,1–0,4	0,0	37,6	43,6	8,9	1,7	3,4	4,8	9,9

Размеры колонок составляют 7 x 7 x 20 см. Такие размеры представляются вполне достаточными, т.к. высота капиллярного поднятия влаги в песчаных отложениях составляет сантиметры. В колонках использовался как высушенный в сушильном шкафу в течение 8 часов при температуре 105°C песок, так и песчаный грунт с влажностью 5,5% массы.

На юге Сибири широко распространены длительно и глубоко сезонно-промерзающие почвенно-грунтовые толщи с близким к земной поверхности залеганием грунтовых вод. Поэтому на предварительном этапе устанавливались профили влажности, сходные с естественным распределением влаги в профиле почв и грунтов на юге Сибири. Для установления такого профиля насыпные колонки песка помещались в емкость с подготовленным водным раствором NaCl. Концентрация раствора составила 5 г/л. В нижней части колонок выполнены отверстия диаметром 2–3 мм для свободного контакта раствора с грунтом в колонках. Для предотвращения испарения емкость с раствором и колонки изолированы полиэтиленовой пленкой.

Колонки выдерживались в емкости с раствором при комнатной температуре (+25°C) в течение 9 суток. Этого промежутка достаточно для установления в них профиля влажности, характерного для почв и пород с близкими грунтовыми водами. Затем в каждом двухсантиметровом слое контрольных колонок устанавливались влажность (термостатно-весовым методом) и содержание химического маркера (путем анализа почвенных вытяжек методом

Мора). Массовое содержание хлорида-иона (в миллиграммах) нормировали на массу песка (в граммах). Случайные отклонения результатов анализа хлорида не превышали 10%, в среднем составляя 3–5%.

Другие экспериментальные колонки после установления в них предварительного профиля влажности помещались в холодильную установку еще на 14 суток. В течение всего этого срока грунт в колонке обеспечивался свободным контактом с раствором из той же емкости. Для обеспечения термоградиентной миграции температура в верхней части колонки поддерживалась на уровне -6°C , у основания колонки — $+3^{\circ}\text{C}$. Спустя 14 суток в этих колонках описанными выше методами определены влажность и содержание химического маркера. На основании изменений в распределении влаги и хлорид-иона сделаны заключения об их передвижении по профилю колонки насыпного грунта под влиянием разницы температур.

Основные результаты

После выдерживания колонок в емкости с раствором при комнатной температуре в течение 9 суток получены следующие профили влажности и распределения хлорида (рис. 1). При неограниченном поступлении воды снизу в обеих колонках сформировался профиль влажности, аналогичный капиллярной кайме грунтовых вод, характеризующийся снижением влажности снизу вверх. Профили влажности и вертикальное распределение хлорид-иона оказались практически идентичными в вариантах с высушенным и с увлажненным песком.

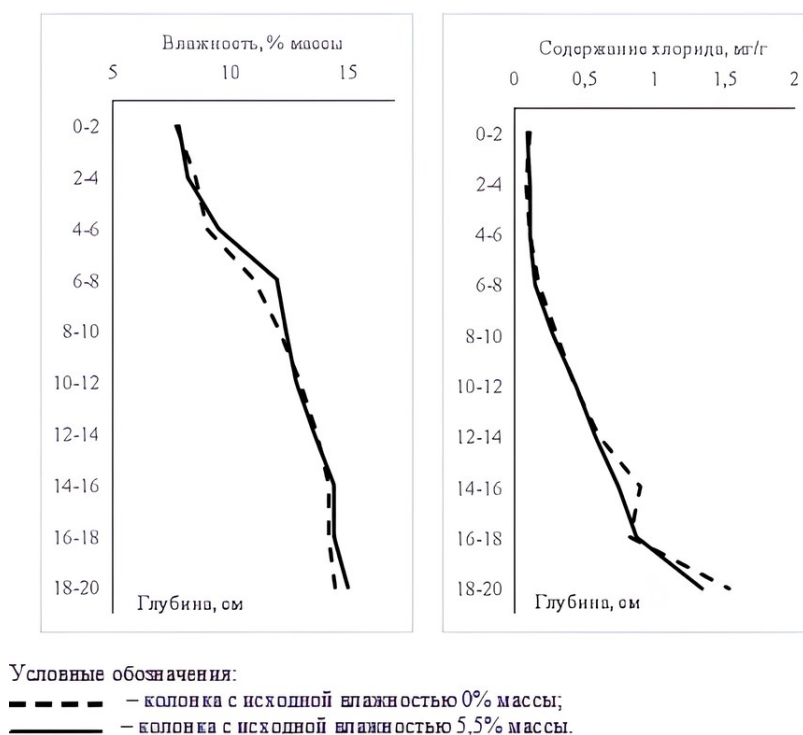


Рисунок 1 - Профили влажности и распределение хлорида в песчаных колонках после выдерживания при температуре 25°C

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.98.2>

Наиболее высокая влажность отмечена на глубинах 18–20 см. На этих отметках сохранялось зеркало водного раствора, поэтому влажность в указанном слое достигала полной влагоемкости и составляла 14–15% массы. В концентрации хлорид-иона на этих глубинах также фиксировались максимальные значения (0,8–1,5 мг/г). В промежутке глубин 4–18 см в обоих случаях отмечено снижение и влажности, и содержания хлорида. Постепенное уменьшение влагосодержания с 14–15 до 8–9% связано с исчезновением из профиля свободной гравитационной воды и со снижением содержания капиллярно-подпертой воды, т.к. вода не по всем имеющимся капиллярам может подняться до отметок 4–6 см. В связи со снижением влагосодержания уменьшается и содержание хлорида от 0,9 до 0,1–0,2 мг/г. В промежутке 0–6 см наблюдается относительно низкое содержание влаги и хлорида. Пониженная влажность связана с невозможностью подъема влаги до этих отметок по капиллярам. Здесь доминирует сорбированная, пленочная влага. Этот приповерхностный слой соответствует горизонту с влажностью на уровне наименьшей влагоемкости, наблюдающемуся выше капиллярной каймы грунтовых вод. В связи со снижением влажности в нем отмечено параллельное уменьшение содержания хлорида.

В полученных результатах обнаружено соответствие между содержанием влаги на конкретных глубинах и концентрацией хлорид-ионов в колонках и с высушенным, и с исходно влажным песком: аппроксимация между влажностью грунта и содержанием в нем хлорида оказалась высокой — R^2 составляет 0,93 и 0,83. Этим подтверждается, что движения воды в парообразном состоянии в колонке при свободном поступлении снизу воды либо вообще нет, либо его трудно отследить используемыми методами. При этом температура окружающей среды и сроки экспозиции были вполне достаточными для внутригрунтового испарения. Значит, передвижение влаги в

парообразном состоянии оказалось ограниченным высокой влажностью песка и его бесструктурностью и, соответственно, низкой пористостью.

В колонках насыпного песка, дополнительно выдерживавшихся в течение 14 суток в холодильной установке, обнаружено следующее распределение влагосодержания и хлорид-иона (рис. 2).

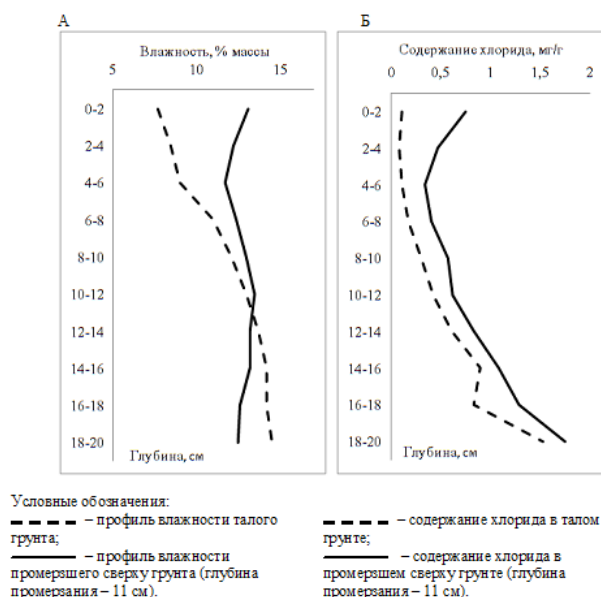


Рисунок 2 - Изменение профиля влажности (А) и содержания хлорида (Б) насыпной колонки песка в результате промерзания сверху в течение 14 суток
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.98.3>

В профиле влажности отразились типичные для промерзающих почвенно-грунтовых толщ особенности. В верхней части колонки (в промежутке глубин 0–11 см) влажность грунта увеличилась, в нижней части (в непромерзшем слое на отметках 11–20 см) — уменьшилась. Подобное перераспределение влаги трактуется как следствие миграции влаги в промерзающий слой под влиянием разницы температур. Этот процесс типичен для влажных горизонтов сезонно-промерзающих почвенно-грунтовых толщ Сибири.

Наибольшая прибавка влаги (5,4% массы или 9,5 мм) наблюдается в слое 0–2 см. С глубиной величина криогенной аккумуляции влаги постепенно уменьшается, и к нижнему краю слоя промерзания сходит на нет. Суммарная величина прибавки составила 25,7 мм. В непромерзшей нижней части колонки содержание влаги уменьшилось на 9,0 мм. Дисбаланс объясняется тем, что остальная влага в зону намерзания поступила из емкости с водным раствором. Аналогичное сохранение влажности в непромерзающей толще и поступление влаги в слой сезонного промерзания из грунтовых вод неоднократно отмечено в степных почвах Западной Сибири с близким залеганием грунтовых вод [12], [13].

Влияние промерзания верхнего слоя грунта на распределение хлорид-ионов оказалось сопоставимым с перераспределением влаги (рис. 2). Наибольшая прибавка содержания хлорида также зафиксирована в слое 0–2 см (на 0,65 мг/г). При движении вглубь промерзшего слоя вслед за снижением увеличения намерзшей влаги уменьшается и прибавка содержания хлорида. С учетом параллельного снижения прибавки влаги и хлорид-иона полагаем, что в описываемом эксперименте при криогенной миграции практически вся влага передвигалась в жидком состоянии.

Закключение

Полученные данные показывают, что метод маркировки передвижения воды в грунте под влиянием температурного градиента является вполне применимым в условиях лабораторных экспериментов.

Высокая пропорциональность между влажностью грунта и содержанием в нем хлорида в предварительных профилях, удовлетворительная пропорциональность между влагосодержанием и массой хлорида при промерзании почв дают основание предполагать, что в задаваемых условиях исходно высоко увлажненных экспериментальных грунтов доминирует передвижение влаги в жидкой форме.

Полученные результаты позволяют надеяться, что раствор хлорида натрия как маркер переноса жидкой влаги можно использовать и в других модельных грунтах для выявления доминирующего механизма миграции влаги.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00104 (<https://rscf.ru/project/24-26-00104/>).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-26-00104 (<https://rscf.ru/project/24-26-00104/>).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Xu H. The relative importance of moisture transfer, soil freezing and snow cover on ground temperature predictions. / H. Xu, J.D. Spitler // *Renewable Energy*. — 2014. — Vol. 72. — P. 1–11.
2. Chalhoub M. A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. / M. Chalhoub, M. Bernier, Y. Coquet et al. // *Renewable Energy*. — 2017. — Vol. 103. — P. 295–307. — DOI: 10.1016/j.renene.2016.11.027
3. Кулик Н.Ф. Дистилляция почвенного раствора под действием температур и возможность его использования растениями / Н.Ф. Кулик // *Почвы и окружающая среда*. — 2018. — Т. 1, № 4. — С. 277–283. — DOI: 10.31251/pos.v1i4.36
4. Min X. Modeling of Coupled Heat-Moisture Transfer and Deformational Behavior of Frozen Soil. / X. Min, F. Xiaopeng, L. Ning // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. — 2018. — Vol. 55. — P. 153–161. — DOI: 10.1007/s11204-018-9519-z.
5. Гаврилов Т.А. Влияние снежного покрова на характер промерзания автомобильной дороги. / Т.А. Гаврилов // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. — 2021. — № 26. — С. 95–99. — DOI: 10.26160/2474-5901-2021-26-95-99
6. Deng M. Impact and Sensitivity Analysis of Soil Water and Heat Transfer Parameterizations in Community Land Surface on the Tibetan Plateau. / M. Deng, X. Meng, Z. Lu et al. // *Journal of advances in modeling Earth systems*. — 2021. — Vol. 13 Iss. 9. — P. e2021MS002670. — DOI: 10.1029/2021MS002670
7. Ван С. Математическое моделирование процесса промерзания грунтов земляного полотна железных дорог в условиях холодного климата / С. Ван, А.Ф. Колос, А.В. Петряев // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2022. — Т. 19, № 4. — С. 820–831. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-820-831
8. Халимов О.З. Физика процессов миграции, кольматации и выпора грунтов при оттаивании у обочин автомобильных дорог Хакасии / О.З. Халимов // *Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института*. — Красноярск : Изд-во КИСИ, 2022. — С. 73–75.
9. Korshunov A.A. Moisture migration index as a characteristic of soil heaving. / A.A. Korshunov, S.V. Churkin, A.L. Nevzorov // *Construction and geotechnics*. — 2024. — Vol. 15, № 3. — P. 79–90. — DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.07
10. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах : монография / Г.М. Фельдман. — Новосибирск : Наука, 1988. — 256 с.
11. Глобус А.М. Физика неизоотермического внутрипочвенного влагообмена : монография / А.М. Глобус. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. — 279 с.
12. Кравцов Ю.В. Влияние многолетней динамики уровня грунтовых вод на зимнее перераспределение влаги в пахотных почвах Ишимской степи / Ю.В. Кравцов // *Почвы и окружающая среда*. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. e250. — DOI: 10.31251/pos.v7i1.250
13. Кравцов Ю.В. Факторы зимнего передвижения влаги в пахотных почвах Ишимской степи / Ю.В. Кравцов // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. — 2024. — Т. 54, № 8. — С. 113–121. — DOI: 10.26898/0370-8799-2024-8-12

Список литературы на английском языке / References in English

1. Xu H. The relative importance of moisture transfer, soil freezing and snow cover on ground temperature predictions. / H. Xu, J.D. Spitler // *Renewable Energy*. — 2014. — Vol. 72. — P. 1–11.
2. Chalhoub M. A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. / M. Chalhoub, M. Bernier, Y. Coquet et al. // *Renewable Energy*. — 2017. — Vol. 103. — P. 295–307. — DOI: 10.1016/j.renene.2016.11.027
3. Kulik N.F. Distillyatsiya pochvennogo rastvora pod deistviem temperatur i vozmozhnost yego ispolzovaniya rasteniyami [Distillation of soil solution under the influence of temperatures and the possibility of its use by plants] / N.F. Kulik // *Pochvi i okruzhayushchaya sreda* [Soils and environment]. — 2018. — Vol. 1, № 4. — P. 277–283. — DOI: 10.31251/pos.v1i4.36 [in Russian]
4. Min X. Modeling of Coupled Heat-Moisture Transfer and Deformational Behavior of Frozen Soil. / X. Min, F. Xiaopeng, L. Ning // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. — 2018. — Vol. 55. — P. 153–161. — DOI: 10.1007/s11204-018-9519-z.

5. Gavrilov T.A. Vliyanie snezhnogo pokrova na xarakter promerzaniya avtomobil'noj dorogi [The influence of snow cover on the nature of highway freezing]. / T.A. Gavrilov // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2021. — № 26. — P. 95–99. — DOI: 10.26160/2474-5901-2021-26-95-99 [in Russian]
6. Deng M. Impact and Sensitivity Analysis of Soil Water and Heat Transfer Parameterizations in Community Land Surface on the Tibetan Plateau. / M. Deng, X. Meng, Z. Lu et al. // Journal of advances in modeling Earth systems. — 2021. — Vol. 13 Iss. 9. — P. e2021MS002670. — DOI: 10.1029/2021MS002670
7. Van S. Matematicheskoe modelirovanie protsessa promerzaniya gruntov zemlyanogo polotna zheleznikh dorog v usloviyakh kholodnogo klimata [Mathematical modeling of the soil freezing process of railway tracks in a cold climate] / S. Van, A.F. Kolos, A.V. Petryaev // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Communications]. — 2022. — Vol. 19, № 4. — P. 820–831. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-820-831 [in Russian]
8. Khalimov O.Z. Fizika protsessov migratsii, kolmatatsii i vipora gruntov pri ottaivanii u obochin avtomobilnikh dorog Khakasii [Physics of migration processes, coloration and soil evaporation during thawing at the roadsides of Khakassia] / O.Z. Khalimov // A collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Civil Engineering Institute. — Krasnoyarsk : Izd-vo KISI, 2022. — P. 73–75. [in Russian]
9. Korshunov A.A. Moisture migration index as a characteristic of soil heaving. / A.A. Korshunov, S.V. Churkin, A.L. Nevzorov // Construction and geotechnics. — 2024. — Vol. 15, № 3. — P. 79–90. — DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.07
10. Feldman G.M. Peredvizhenie vlagi v talikh i promerzayushchikh gruntakh [Movement of moisture in thawed and freezing soils] : monograph / G.M. Feldman. — Novosibirsk : Nauka, 1988. — 256 p. [in Russian]
11. Globus A.M. Fizika neizotermicheskogo vnutripochvennogo vlagoobmena [Physics of non-isothermal intra-soil moisture exchange] : monograph / A.M. Globus. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1983. — 279 p. [in Russian]
12. Kravtsov Yu.V. Vliyanie mnogoletnei dinamiki urovnya gruntovikh vod na zimnee pereraspredelenie vlagi v pakhotnikh pochvakh Ishimskoi stepi [The influence of long-term dynamics of the groundwater level on the winter redistribution of moisture in arable soils of the Ishim steppe] / Yu.V. Kravtsov // Pochvi i okruzhayushchaya sreda [Soils and environment]. — 2024. — Vol. 7, № 1. — P. e250. — DOI: 10.31251/pos.v7i1.250 [in Russian]
13. Kravtsov Yu.V. Faktori zimnego peredvizheniya vlagi v pakhotnikh pochvakh Ishimskoi stepi [Factors of winter moisture movement in arable soils of the Ishim steppe] / Yu.V. Kravtsov // Sibirskii vestnik selskokhozyaistvennoi nauki [Siberian Bulletin of Agricultural Science]. — 2024. — Vol. 54, № 8. — P. 113–121. — DOI: 10.26898/0370-8799-2024-8-12 [in Russian]