



Экспериментальное изучение термоградиентной миграции влаги в грунте с использованием химического маркера

© 2025 Ю. В. Кравцов , А. П. Рыжих 

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет», ул. Вилуйская, 28,
г. Новосибирск, 630126, Россия. E-mail: kravtsov60@mail.ru, redryzhikh@ya.ru

Цель исследования. Экспериментальное изучение термоградиентной миграции влаги в грунте с использованием химического маркера.

Место и время проведения. Исследование проводили в лабораторных условиях в течение февраля – мая 2025 г.

Методы. Изучение перераспределения влаги под влиянием температурного градиента осуществляли в колонках насыпного грунта разного гранулометрического состава. Для выявления преобладающей формы мигрирующей влаги использовали метод химического маркирования. В качестве маркера применяли хлорид-ион. Для формирования в модельных грунтах профиля влажности, аналогичного распределению воды в высоко увлажненных естественных грунтах, пары колонок с заранее заданным содержанием влаги (9,6–19,8% массы) выдерживали в течение 14 суток при температуре +25°C. Затем в одной из колонок каждой пары определяли профильное распределение влаги. Вторую колонку, увлажненную водным раствором хлорид-иона, помещали в холодильную установку и подвергали охлаждению сверху до отрицательных температур. В нижних частях экспериментальных колонок сохранялась положительная температура. Спустя 14 суток во вторых колонках определяли вертикальное распределение влаги термостатно-весовым методом и хлорид-иона методом Мора. Образцы отбирали в каждом 2-см слое в двукратной повторности. Выводы о формах передвижения влаги под влиянием температурного градиента делали на основании послойного распределения хлорид-иона.

Основные результаты. Установлены профили влажности высоко увлажненных грунтов при температуре +25°C, сходные с вертикальным распределением влаги в грунтах юга Сибири в летний сезон. В суглинистых и супесчаных вариантах на глубинах 4–12 см отмечено снижение влажности на 1% массы и ее повышение на 1–2% в слое 0–4 см. Это связано с внутригрунтовым испарением влаги и с ее аккумуляцией перед изолирующей пленкой на поверхности колонок. Вертикальное распределение влагосодержания сходно с профилем увлажненных степных суглинистых грунтов на паровых участках при положении грунтовых вод ниже критической глубины. В песчаных вариантах установлено снижение содержания влаги в слое 0–10 см на 1,0–2,5% массы и соответствующее увеличение влажности в нижней части колонок вследствие перемещения части влаги под влиянием силы тяжести. В песчаных колонках появились черты сходства их профиля влажности с аналогичными профилями естественных грунтов с близко расположенными грунтовыми водами.

В результате охлаждения сверху в колонках установлено передвижение влаги в промерзший слой из нижней части. Наибольший объем миграции отмечен в песчаном грунте: влагосодержание в промерзшей части возросло на 5–10% массы. С утяжелением гранулометрического состава грунтов объем перераспределенной влаги снижается. Полученные профили влажности аналогичны отрезку профиля влажности естественных грунтов в нижней части зоны намерзания влаги и верхней части зоны подмерзлотного иссушения при залегании грунтовых вод ниже критической глубины.

Установлена однотипность вертикального распределения хлорид-иона в экспериментальных колонках после их охлаждения. Особенности профильного распределения хлорида явились резкое увеличение его содержания в промерзшем фрагменте и относительно равномерное распределение по талой части профиля. На этом основании полагаем, что в криогенной миграции в высоко увлажненных грунтах (в песчаном с влажностью 9,6 и 13,9%; в супесчаном с влажностью 15,4% и в тяжелосуглинистом с влажностью 19,8%) доминировала жидкая влага. Установление послойного соответствия содержания влаги и хлорид-иона показало, что наибольшая роль жидкой воды в криогенном перераспределении влаги характерна для тяжелосуглинистого грунта.

Заключение. В результате проведенной работы уточнены параметры влажности экспериментальных грунтов, при которых криогенная миграция влаги осуществляется преимущественно в жидком состоянии. В дальнейшем предполагается последовательно снижать исходную влажность грунтов для установления условий, при которых происходит смена преобладающего потока влаги.

Ключевые слова: колонки насыпного грунта; профиль влажности; термоградиентное передвижение; хлорид-ион; криогенная аккумуляция.

Цитирование: Кравцов Ю.В., Рыжих А.П. Экспериментальное изучение термоградиентной миграции влаги в грунте с использованием химического маркера // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 2. e315. DOI: [10.31251/pos.v8i2.315](https://doi.org/10.31251/pos.v8i2.315)

ВВЕДЕНИЕ

Передвижение влаги в глубоко и длительно промерзающих почвенно-грунтовых толщах степи и лесостепи Западной Сибири под влиянием температурного градиента является важным элементом их водного режима. Миграция и последующая аккумуляция почвенно-грунтовой воды в сезонно-промерзающем слое отражается на запасах доступной растениям влаги в предстоящий сезон вегетации, на скорости прогревания глубоких горизонтов почв и их пористости аэрации. Криогенному передвижению и накоплению влаги отводится определенная роль в формировании генетических особенностей почв Сибири. Переувлажнение материнских пород, обусловленное криогенной аккумуляцией почвенно-грунтовой влаги, рассматривается как одна из причин формирования современного подпочвенного гидроморфизма в пределах степных плакорных участков, выполненных тяжелыми по гранулометрическому составу отложениями (Панфилов и др., 1988).

Однако, несмотря на очевидную практическую и теоретическую значимость вопроса, результаты изучения передвижения влаги в почвах и грунтах южной части Сибири под влиянием температурного градиента трудно назвать исчерпывающими. В течение второй половины XX столетия зимняя миграция почвенной и грунтовой влаги изучалась в разных районах Сибири (Сребрянская, 1954; Орловский, 1955; Мосиенко, 1957; Киссис, 1969; Невечеря, 1970; Панфилов, 1973; Сеньков, 1978; Гиличинский, 1986; Куликов и др., 1986; Кравцов, 1992; и др.). Исследователями установлены количественные данные по термоградиентному перераспределению влаги; показана качественная зависимость параметров ее аккумуляции от осенней влажности почв, глубины проникновения в них отрицательных температур, гранулометрического состава почв и пород; выявлено значение зимнего перераспределения влаги в формировании почвенных водных ресурсов на предстоящий сезон вегетации. На основании анализа этих материалов составлено представление о географии зимней миграции влаги в почвах и грунтах южных районов Сибири, параметрах и основных факторах криогенной аккумуляции влаги (Кравцов, 2024а).

Вместе с тем, имеющиеся данные в настоящее время характеризуются преимущественно исторической ценностью. В течение последних десятилетий наблюдается выраженная многолетняя динамика показателей степного и лесостепного климата (Литвинова, 2020), а также антропогенные изменения сибирских степных почв (Кравцов, Смоленцева, 2022), в том числе, их гидрологического состояния. Как отражаются эти изменения на зимнем передвижении почвенно-грунтовой влаги в южных районах Сибири – отчетливого понимания пока нет. В печати отсутствуют результаты современных режимных наблюдений за миграцией почвенной влаги в степной и лесостепной зонах Сибири в течение холодного сезона года. Известны лишь работы, в которых зимнее перераспределение влаги рассматривается как условие формирования льдистого экрана в почвах (Танасиенко, Чумбаев, 2010). В литературе отсутствуют новые сведения о результатах экспериментального изучения передвижения влаги в почвенных монолитах, насыпных колонках грунта и искусственных пористых средах, полученных методом 3D-печати. Между тем, эти материалы были бы полезны для составления прогноза параметров зимнего передвижения влаги в почвах южных районов Сибири.

Для предсказания величин термоградиентной миграции влаги в почвах и грунтах важно иметь представление о механизмах ее передвижения. В течение последней четверти прошлого столетия опубликованы обобщающие сводки по вероятным механизмам передвижения влаги в промерзающих грунтах, основанным на результатах многочисленных лабораторных экспериментов и математическом аппарате, описывающем этот процесс (Глобус, 1983; Фельдман, 1988). Установлено три составных части в потоке почвенной влаги к фронту промерзания: 1) пародиффузионный поток; 2) термокапиллярный поток и 3) поток, обусловленный резким уменьшением потенциала влаги при замерзании. Первый поток доминирует при низкой влажности промерзающей почвы, второй и третий – при высокой.

Вместе с тем, граничные параметры среды, при которых поток преимущественно жидкой влаги сменяется движением влаги в парообразном состоянии, до сих пор остаются не раскрытыми. Установление таких условий возможно при экспериментальных работах. В начале важно получить подтверждение доминирования передвижения влаги в жидком виде при повышенной влажности

почвы или грунта. В дальнейшем достаточно пошагово изменять внешние параметры среды для установления граничных условий, при которых происходит смена преобладающего потока влаги.

Нужно также отметить, что в новом тысячелетии необходимость прогноза параметров термоградиентного передвижения влаги в сезонно-промерзающих почвенно-грунтовых толщах разных регионов планеты заставила исследователей сосредоточить усилия на создании математических моделей этого процесса. К настоящему времени известно значительное количество таких моделей (Лазарев, Шешенин, 2015; Gelfan, 2007; Zhu et al., 2007; Xu, Spitler, 2014; Chalhoub et al., 2017; Xe et al., 2018; Deng et al., 2021; Dopfer et al., 2022; и др.). Однако все они базируются на разных показателях, поэтому оказываются применимыми только в отдельных регионах Земли или для решения узких задач.

Представленный краткий обзор позволяет заключить следующее.

Сведения о масштабных полевых режимных наблюдениях за процессами зимнего перераспределения почвенно-грунтовой влаги в южных районах Сибири в течение нового тысячелетия не известны. Следовательно, не изучается влияние климатических колебаний последних десятилетий и разнообразных антропогенных изменений почв на параметры термоградиентной миграции почвенно-грунтовой влаги.

В свободном доступе отсутствуют работы отечественных исследователей последних десятилетий по лабораторному изучению изменений профиля влажности промерзающих почв и грунтов. Очевидно, что не накапливаются данные, на основании которых возможно создание математических моделей зимнего термоградиентного передвижения влаги в почвах, применимых к условиям Сибирского региона.

Создаваемые в последние годы модели перераспределения влаги в почвах и в грунтах в течение холодного сезона года характеризуются преимущественно региональным значением.

Из представленного обзора следует перечень возможных задач по изучению термоградиентного перераспределения влаги в почвенно-грунтовых толщах южной части Сибири, включающий и изучение передвижения влаги в промерзающих грунтах в лабораторных условиях (Кравцов, 2024б). В результате такой работы необходимо: 1) накопить массив данных для построения числовых моделей передвижения влаги в сезонно-промерзающих почвах именно южных районов Сибири; 2) установить количественные пропорции между параметрами перемещения влаги и внешними условиями (влажностью почв и грунтов, их гранулометрическим составом, температурным градиентом и пр.); 3) уточнить параметры среды, при которых миграция влаги осуществляется преимущественно в жидком или парообразном состоянии. Для решения последней задачи используются химические маркеры.

Настоящая работа посвящена уточнению параметров среды, при которых миграция влаги в грунтах осуществляется преимущественно в жидком виде.

Цель работы – экспериментальное изучение термоградиентной миграции влаги в грунте с использованием химического маркера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование передвижения влаги под влиянием температурного градиента осуществляли в насыпных колонках грунта различного гранулометрического состава, отобранного в южных районах Западной Сибири. Выбор районов и глубинных отметок отбора грунтов обусловлен следующими обстоятельствами. Термоградиентная миграция и криогенная аккумуляция влаги в почвенно-грунтовых толщах юга Сибири используемыми методами исследования выявляется только в исходно высоко увлажненных горизонтах (порядка уровня наименьшей влагоемкости). Так, согласно материалам многолетних режимных глубокопрофильных гидрологических наблюдений, почвы Ишимской степи при выращивании типичных для них яровых зерновых культур «уходят» в зиму со слоем эваподесуктивного иссушения мощностью 0,8–1,0 м. Влажность в этом слое может понижаться к осени до уровня влажности завядания и ниже. Поэтому термоградиентная миграция влаги в слое летнего иссушения не проявляется; она выражена только в нижних почвенных горизонтах (в основном, в горизонте С) и в подпочвенных породах (на глубинах от 0,8 до 1,7 м). В связи с этим, в Ишимской степи образцы для экспериментальных работ отбирались из горизонта С черноземов южных – с глубины 0,9–1,3 м. Гранулометрический состав образцов – тяжелосуглинистый высоко илистый (табл.). Содержание пылеватых фракций в большинстве случаев не достигает 30%, поэтому почвообразующую породу характеризуют как лессовидную. Почвообразующими породами в Ишимской степи являются субэзральные верхнечетвертичные

отложения лессовидного облика, перекрывающие практически повсеместно все более ранние отложения на Ишим-Иртышском степном междуречье. Повышенное содержание ила обусловлено переиванием и переотложением озерных осадков преимущественно среднелейстоцевого возраста.

Таблица

Гранулометрический состав грунтов

Глубина, м	Потери от обработки 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
Ишимская степь. Тяжелый суглинок								
0,9–1,3	10,8	0,0	10,8	18,4	12,2	12,9	34,9	60,0
Новосибирское Приобье. Супесь								
1,4–1,5	0,0	0,3	22,3	61,3	8,4	5,1	2,6	16,1
Новосибирское Приобье. Песок								
0.1–0.4	0.0	37.6	43.6	8.9	1.7	3.4	4.8	9.9

Для установления специфики процессов термоградиентного передвижения влаги в тяжелосуглинистом грунте аналогичные образцы отбирались в других районах южной окраины Сибири. Супесь отобрана на водораздельном пространстве Новосибирского Приобья из горизонта С типичных для этой местности черноземов выщелоченных. Отбор произведен с глубин 1,4–1,5 м в связи с большей вертикальной мощностью профиля чернозема выщелоченного по сравнению с ишимскими черноземами южными. Почвообразующей породой в Новосибирском Приобье считаются субэдральные верхнечетвертичные отложения. В отличие от Ишимской степи, в них понижено содержание илстой фракции.

Кроме того, в экспериментальную работу включены и песчаные отложения, которые отобраны из современных аллювиальных осадков в пойме Оби.

Гранулометрический состав грунтов определен по Н.А. Качинскому (Шейн и др., 2016).

Изучение миграции влаги проводили в колонках равномерно перемешанного грунта, предварительно обезвоженного при температуре 105°C в течение 24 часов. Насыпные колонки имели размеры 7 × 7 × 20 см. Грунт в них со всех сторон защищен от потерь влаги на испарение. В связи с поставленной задачей выявить граничное влагосодержание, при котором в грунтах разного гранулометрического состава отмечается переход от термоградиентного передвижения влаги преимущественно в жидком состоянии к миграции влаги преимущественно в парообразном состоянии, намечено постепенное плановое снижение исходного влагосодержания в изучаемых грунтах. В качестве начальной избрана влажность сверх уровня наименьшей влагоемкости, при которой криогенная миграция влаги гарантированно будет осуществляться преимущественно в жидком виде. Величины наименьшей влагоемкости заимствованы из опубликованных работ (Агрофизическая ..., 1976; Слесарев, Кудряшова, 1988). В песчаном грунте влажность задавали в диапазоне 9,6–13,9% массы; в супеси – 15,4% массы; в тяжелом суглинке – 19,8% массы. В представляемой серии опытов насыпные грунты лишены пленочно-капиллярной подпитки влагой.

Для определения миграции влаги в жидком состоянии использовался химический маркер – хлорид-ион (хлорид), который перераспределяется в пространстве только при движении жидкого носителя и не изменяет своего положения при перемещении парообразного. В экспериментальных работах использовали 5% водный раствор хлорида натрия.

Для установления участия жидкой воды в миграции влаги при промерзании грунтов эксперимент выстроен в два этапа. На начальном этапе задача состояла в установлении профиля влажности в насыпных колонках, аналогичного вертикальному распределению влаги в высокоувлажненных естественных грунтах. На второй этап выявляли роль миграции влаги в жидком состоянии в экспериментальных колонках с установившимся профилем влажности при их промерзании.

Для выполнения поставленных задач готовили пары идентичных колонок с одним вариантом грунта и его одинаковой влажностью. Первые колонки увлажняли незасоленной водой, вторые – водным раствором хлорид-иона. Для установления профиля влажности в высокоувлажненных грунтах пары экспериментальных колонок выдерживали в течение 14 суток при температуре +25°C. Затем в первых колонках определяли вертикальное распределение влаги. Вторые колонки далее подвергались воздействию отрицательных температур в верхней их части еще в течение 14 суток.

Для этого их помещали в холодильную камеру. У поверхности колонок поддерживали постоянную температуру -3°C , у основания колонок температура была $+6^{\circ}\text{C}$. По истечению двух недель во вторых колонках определяли вертикальное распределение влаги и хлорид-иона.

Влажность грунта определяли термостатно-весовым методом (Шеин и др., 2016); содержание хлорид-иона – методом Мора (Кристиан, 2009). Отбор образцов из колонок осуществляли из каждого 2-см слоя в двукратной повторности. Для определения абсолютных величин намерзания влаги использовали перевод влагосодержания в проценты объема грунтов. Объемная масса абсолютно сухих вариантов насыпных грунтов составила $1,68 \text{ г/см}^3$.

Заключение о передвижении жидкой или парообразной влаги в профиле насыпных колонок грунта делали на основании совместного анализа перераспределения содержания хлорид-иона и влажности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основной результат первого этапа эксперимента представлен на рисунке 1.

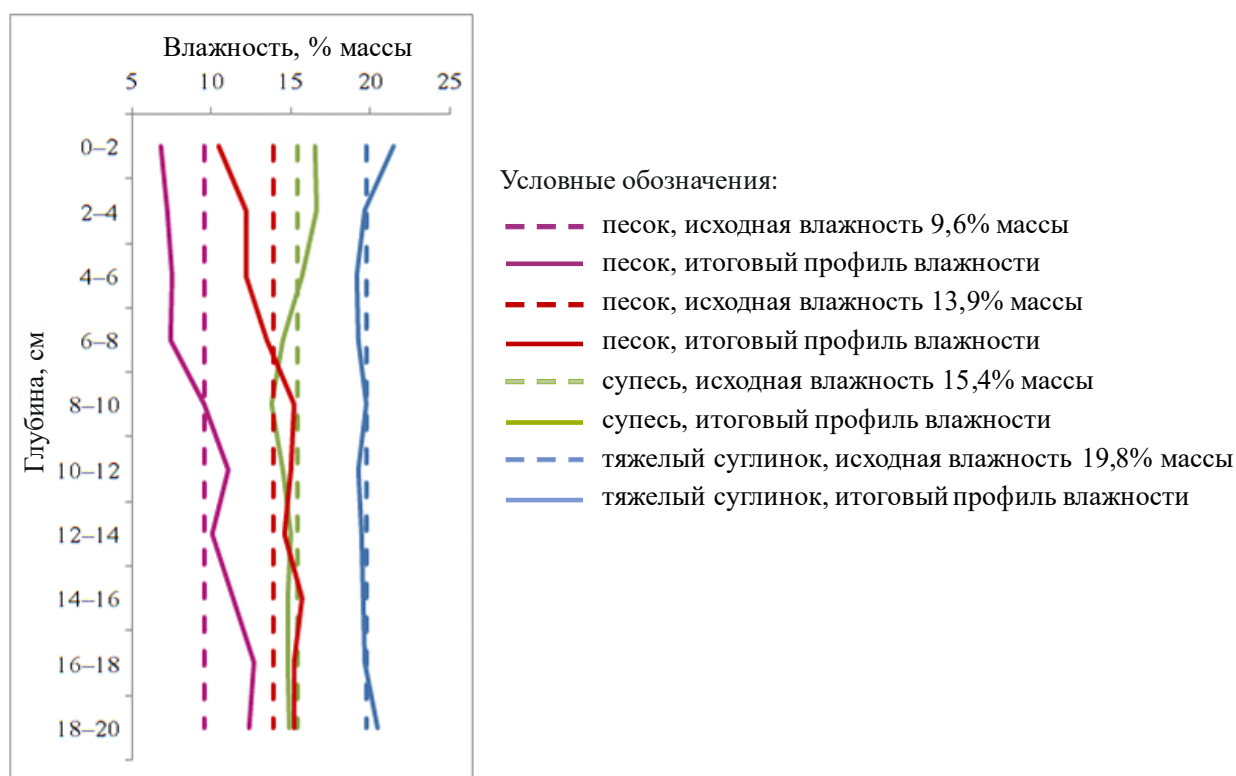


Рисунок 1. Профили влажности насыпных колонок грунта спустя 14 суток выдерживания при комнатной температуре.

За две недели профили влажности наиболее заметно изменились в колонках с песчаным грунтом (см. рис. 1). В приповерхностных слоях (на глубине 0–8 см) содержание влаги в них снизилось на 1–2,5% массы. На отметках глубин 10–20 см влагосодержание возросло на 0,5–2,5% массы, а в песчаной колонке с исходной влажностью 9,6% массы на глубинах 16–20 см отмечено наибольшее возрастание влагосодержания – на 3%. Такое перераспределение влаги в высоко увлажненном грунте связано с миграцией части воды под воздействием гравитации. Наименьшая влагоемкость в горизонте С песчаных и супесчаных почв ненарушенного сложения составляет 7–10% массы, поэтому в экспериментальных колонках при заданных значениях влажности присутствует влага сверх уровня наименьшей влагоемкости. Выявленное перераспределение влаги в песчаном грунте дает основание полагать, что в песчаных колонках с влажностью более 9% массы термоградиентное перераспределение влаги в промерзающий слой будет выраженным.

В колонках с тяжелосуглинистым и супесчаным грунтом профиль влажности за две недели изменился слабее, чем в емкостях с песком. Заданные параметры влажности в суглинистом и супесчаном вариантах не слишком отклоняются от уровня наименьшей влагоемкости, которые

колеблются от 15 до 24% массы. В колонках с суглинистым и супесчаным грунтом отмечается небольшое (порядка 1% массы и менее) послойное изменение влагосодержания в верхней части профиля – на отметках 0–12 см. В тяжелом суглинке на глубинах 2–10 см, а в супеси – на отметках 4–12 см влажность понизилась, а в приповерхностном слое в обоих вариантах повысилась. Такое изменение обусловлено расходом влаги на испарение. Поскольку поверхность колонок изолирована водонепроницаемой пленкой, поднимающаяся влага перераспределяется в приповерхностном слое колонок. На основании обзора динамики профиля влажности суглинистых и супесчаных грунтов полагаем, что при заданных условиях величины криогенной аккумуляции влаги в них будут более низкими, чем в вариантах с песчаным грунтом.

На рисунке 2 показано изменение профиля влажности экспериментальных колонок в результате двухнедельного их замораживания сверху.

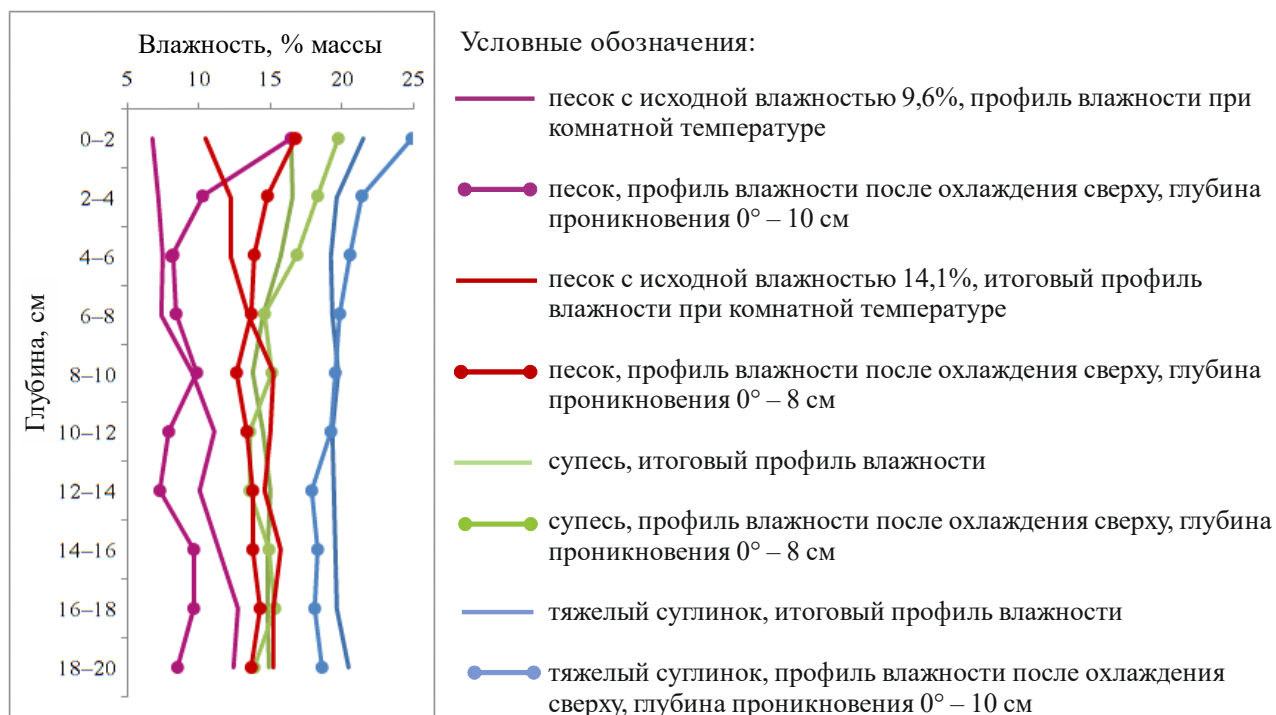


Рисунок 2. Профили влажности насыпных колонок грунта спустя 14 суток охлаждения сверху до отрицательных температур верхней части профиля.

Термоградиентное перераспределение влаги проявилось во всех грунтах сходным образом. В верхней части колонок сформировалась зона ее криогенной аккумуляции, в нижней – зона подмерзлотного иссушения. Объем намерзшей влаги закономерно возрастает к верхней поверхности всех колонок, со стороны которой грунты подвергались охлаждению до отрицательных температур. Поскольку концентрация соли в водном растворе задана на низком уровне (5 г/л), между границей проникновения отрицательных температур в грунт и нижней границей слоя «намерзания» влаги отчетливого различия используемыми методами не установлено. Глубина проникновения отрицательных температур в экспериментальные колонки оказалась сходной – 8–10 см.

Различия выявлены в величинах миграции влаги. Наибольший размах ее передвижения установлен в колонках песчаного грунта. Так, в варианте с исходной влажностью 9,6% массы в слое 0–2 см содержание влаги возросло от исходных 6,8% до 16,5%. Общее намерзание влаги в слое 0–10 см в песчаном грунте с исходной влажностью 9,6% массы составило 4,8 мм или 14,8% объема воды в колонке. В песчаной колонке с исходной влажностью 13,9% объем намерзания влаги в слое 0–8 см достиг 3,6 мм (7,8% количества воды в колонке). В суглинистых и супесчаных разностях увеличение влажности оказалось меньшим и составило менее 3,5% массы. Объем намерзания влаги также оказался более низким: в супеси – 2,5 мм в слое 0–10 см (5% общего содержания влаги), тяжелосуглинистой разности – 2,5 мм в слое 0–8 см (3,8% количества влаги). Соответственно и объем подмерзлотного иссушения более выражен в песчаных разностях – до 4% массы на глубине 18–20 см

в варианте с исходной влажностью 9,6%. В суглинке и супеси снижение влажности в зоне подмерзлотного иссушения не достигало 1,5% массы.

Полученные экспериментальные данные по термоградиентному передвижению влаги в колонках насыпного грунта соответствуют установленным ранее закономерностям криогенной миграции почвенной влаги в южной части Сибири. Определено, что при высокой (выше уровня наименьшей влагоемкости) исходной влажности объем миграции и последующей криогенной аккумуляции влаги возрастает по мере облегчения гранулометрического состава почвенно-грунтовой толщи (Кравцов, 2024а). При глубоком залегании грунтовых вод влага в слой сезонного промерзания перераспределяется из влажной непромерзающей толщи; содержание влаги в этой толще в итоге снижается и возникает зона подмерзлотного иссушения (Сеньков, 1978).

Следующим шагом в экспериментальной работе явилось установление участия жидкой влаги в ее миграции в промерзающий слой грунтов. Это участие определялось по перераспределению хлорид-иона. Для промерзающих сверху грунтов с повышенной влажностью получено его однотипное вертикальное распределение (рис. 3). Во всех профилях наблюдается возрастание содержания хлорида в верхней, промерзшей части грунта. Причем, по мере приближения к верхней поверхности колонок концентрация хлорида увеличивается.

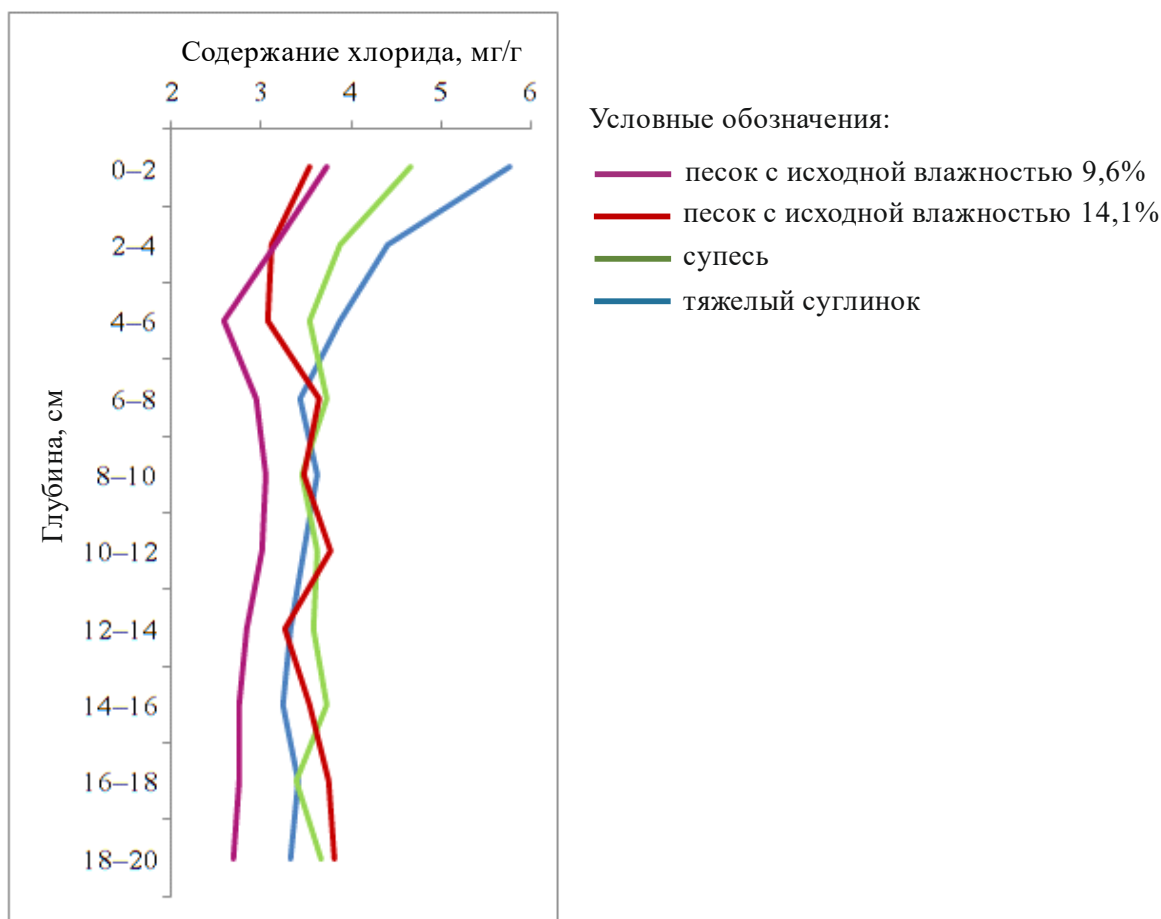


Рисунок 3. Распределение хлорид-иона по профилю насыпных колонок грунта после их замораживания сверху.

Наиболее выраженным возрастанием концентрации хлорид-иона в промерзшей части профиля оказалось в тяжелосуглинистом грунте, в котором выявлено наименьшее изменение профиля влажности при промерзании. В этой колонке от нижней границы слоя промерзания до верхней поверхности содержание хлорид-иона увеличивалось от 3,6 до 5,8 мг/г. В нижней части колонки среднее содержание хлорида составило 3,4 мг/г. В варианте с тяжелосуглинистым грунтом отмечено наиболее выраженное послойное распределение влажности и хлорид-иона в профиле после замораживания верхней части (рис. 4 а); как результат — очень высокая пропорциональность между влажностью грунта и содержанием в нем хлорид-иона (коэффициент аппроксимации составил

0,94 (рис. 5 а)). Это означает, что в данном случае практически все передвижение воды происходило в жидком виде, что обусловлено особенностями физических свойств изучаемого грунта. Ишимские тяжелосуглинистые материнские породы отличаются повышенным содержанием илистой фракции (до 45%), чем предопределены пониженные значения в них общей пористости (45–52% объема) и господствующее положение микропор в ее структуре (60–70% порового пространства или 28–38% объема почвы); на макропоры приходится 2–9% порового пространства (1–4% объема грунта). В результате перемешивания грунта значения пористости оказались еще более сниженными. При высокой исходной влажности, составляющей 116% уровня наименьшей влагоемкости, пористость аэрации в таких грунтах не может быть удовлетворительной; передвижение парообразной влаги в таких условиях маловероятно.

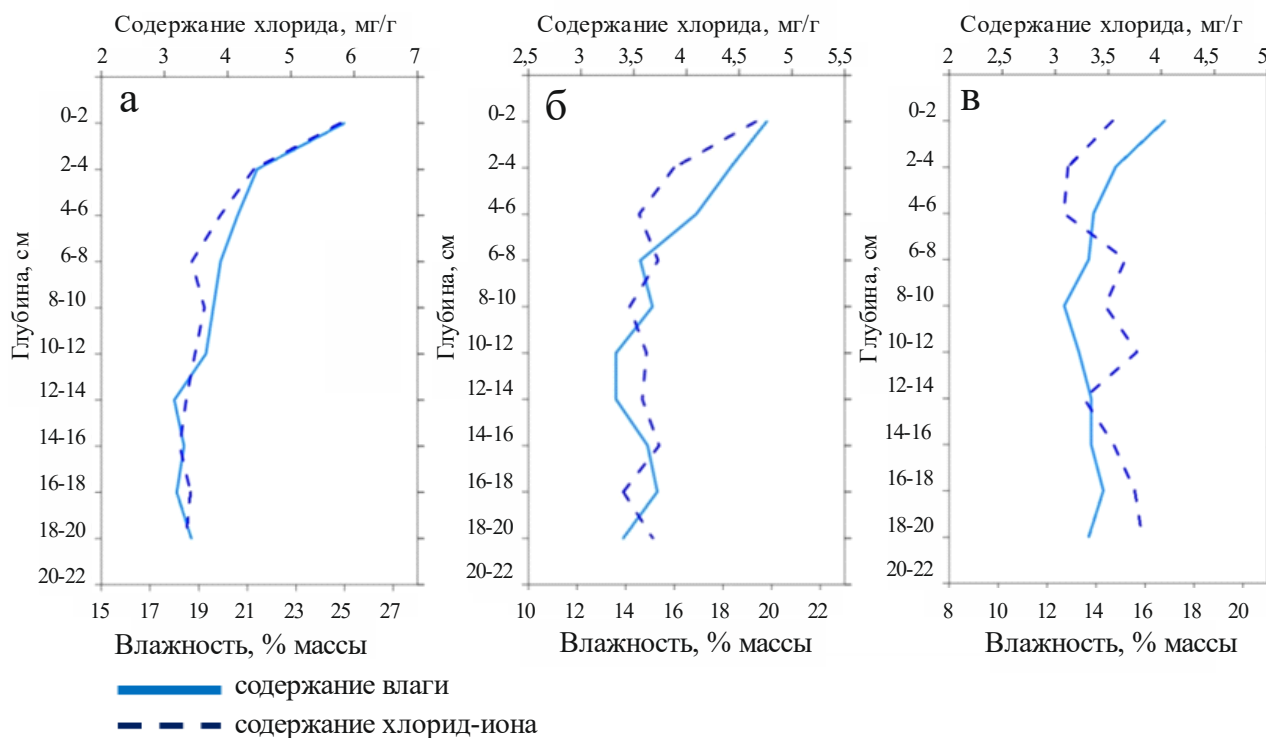


Рисунок 4. Соответствие профиля влажности: а – тяжелосуглинистого; б – супесчаного; в – песчаного (исходная влажность 14,1%) грунта после охлаждения до отрицательных температур и вертикального распределения в нем хлорид-иона.

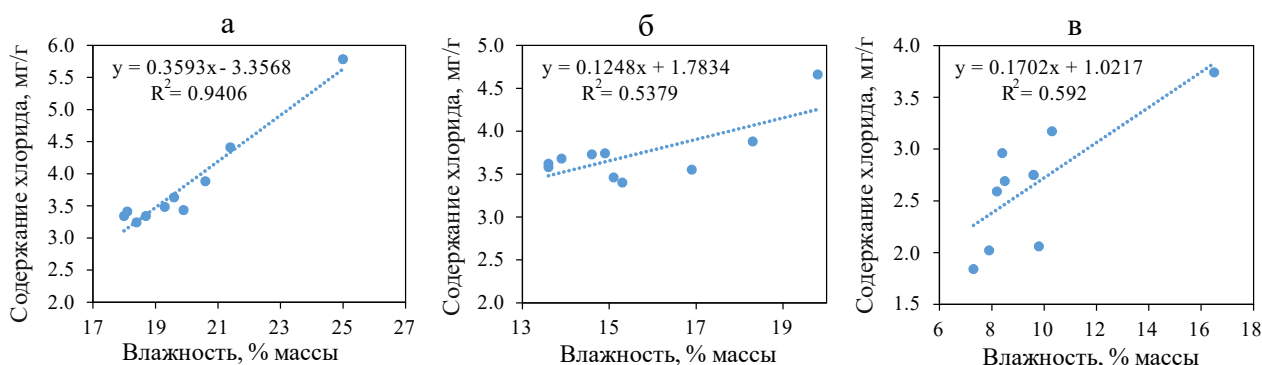


Рисунок 5. Пропорциональность между влажностью грунта и содержанием в нем хлорид-иона после замораживания верхней части профиля: а – колонка тяжелого суглинка; б – колонка супеси; в – колонка песчаного грунта с исходной влажностью 9,6%

По мере облегчения гранулометрического состава грунта возрастание концентрации хлорид-иона в промерзшей части профиля снижается, уменьшаются и абсолютные величины перераспределения хлорида в промерзший слой. Так, в супеси концентрация хлорида в промерзшем слое увеличилась снизу вверх с 3,7 мг/г до 4,7 мг/г; объем мигрировавшего с жидкой водой хлорид-

иона составил 1,3 мг или 3,5% общей массы хлорида в колонке. В супеси установлено значительно меньшее соответствие послойного распределения влажности и хлорид-иона (рис. 4 б) и более низкая пропорциональность между содержанием влаги и концентрацией хлорид-иона (рис. 5 б).

В песчаных вариантах соответствие послойного распределения влажности и хлорида оказалось еще менее выраженным, несмотря на наибольший размах криогенной миграции влаги в насыпных колонках именно песчаного грунта (рис. 4 в и 5 в).

Таким образом, в грунтах супесчаного и песчаного состава не обнаружено столь высокого соответствия между изменениями профиля влажности при промерзании грунта и перераспределением хлорид-иона, как в тяжелосуглинистом грунте. Это дает основание полагать, что криогенная миграция влаги в высокоувлажненном супесчаном и песчаном грунте осуществляется не только в жидком виде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены итоги одного из первых шагов в экспериментальном изучении криогенной миграции влаги в грунте. Полученные результаты в целом соответствуют известным материалам полевых почвенно-гидрологических наблюдений в южных районах Сибири.

На предварительном этапе эксперимента установлен профиль влажности изначально высоко и равномерно увлажненных грунтов при комнатной температуре, который можно считать аналогом вертикального распределения влаги в почвенно-грунтовых толщах южных районов Сибири в теплый сезон года. В суглинистом и супесчаном вариантах отмечены незначительные изменения профиля влажности в верхней половине колонок: на глубинах 4–12 см влажность снизилась приблизительно на 1%, в слое 0–4 см – повысилась на 1–2%. Полагаем, что такое изменение связано с внутригрунтовым испарением влаги при высоких температурах среды и ее аккумуляцией под изолирующей пленкой на поверхности колонок. В итоге в колонках суглинистого и супесчаного грунта в средней их части наметилась зона с пониженным влагосодержанием, профиль влажности приобрел черты сходства с аналогичным профилем высоко увлажненных степных грунтов тяжелосуглинистого высоко илистого гранулометрического состава. Такое вертикальное распределение влаги характерно для плакорных участков Ишимской степи на поле чистого пара при положении грунтовых вод ниже критической глубины.

В песчаных вариантах наиболее заметно проявилось передвижение части влаги в нижнюю часть профиля. В песчаных колонках установлено снижение содержания влаги в слое 0–10 см на 1,0–2,5% и соответствующее увеличение влажности в нижней части колонок. Полагаем, что в нижнюю часть профиля высоко увлажненного (сверх уровня наименьшей влагоемкости) песчаного грунта переместилась часть влаги под влиянием силы тяжести. В итоге в колонках песчаного грунта появились черты сходства их профиля влажности с аналогичными профилями естественных грунтов с близко расположенными грунтовыми водами. Влажность грунтов в обоих случаях закономерно возрастает сверху вниз.

В результате последующего охлаждения сверху во всех профилях проявилось передвижение влаги в промерзающий слой из нижней, не промерзшей части, в которой образовалась зона подмерзлотного иссушения. Наибольший объем передвижения влаги отмечен в вариантах песчаного грунта. В них выявлено возрастание влагосодержания в промерзшей части профиля на 5–10% и снижение влажности в талой части колонок на 2–4%. Таким образом, профили влажности высоко увлажненного песчаного грунта оказались подвержены наибольшим изменениям как в результате его пребывания при комнатной температуре, так и вследствие замораживания верхней части песчаных колонок. С утяжелением гранулометрического состава грунтов объем мигрировавшей в них влаги снижается. По внешним особенностям полученные в результате охлаждения профили влажности экспериментальных колонок аналогичны отрезку профиля влажности естественных грунтов в нижней части зоны намерзания влаги и в верхней части зоны подмерзлотного иссушения при залегании грунтовых вод ниже критической глубины.

Вертикальное распределение хлорид-иона во всех экспериментальных колонках после замораживания их верхней части оказалось однотипным. Характерными особенностями профильного распределения хлорида явились: резкое увеличение его содержания в промерзшей части, все более возрастающее к поверхности колонок; относительно равномерное его распределение в талой части профиля. На основании однотипного распределения содержания хлорид-иона в промерзшей части всех экспериментальных колонок полагаем, что в криогенной миграции во всех предварительно высоко увлажненных грунтах песчаного, супесчаного и суглинистого состава принимала участие

жидкая влага. Установление послойного соответствия содержания влаги и хлорид-иона показало, что наибольшая роль в морозном перераспределении влаги принадлежит жидкой воде в тяжелосуглинистом высоко увлажненном грунте. С облегчением гранулометрического состава соответствие послойного распределения влаги и хлорид-иона оказалось не столь высоким. На этом основании предполагаем, что криогенная миграция влаги в высокоувлажненных грунтах супесчаного и песчаного-состава осуществляется не только в жидком виде.

В результате проведенной работы уточнены параметры влажности экспериментальных грунтов, при которых криогенная миграция влаги осуществляется преимущественно в жидком состоянии. В дальнейшем предполагается последовательно снижать исходную влажность грунтов для установления граничных условий, при которых происходит смена преобладающего потока жидкой влаги на движение влаги в парообразном состоянии. Еще одним важным направлением исследований представляется изучение термоградиентной миграции влаги в почвенных и почвенно-грунтовых монолитах, в том числе, в монолитах, неоднородных по гранулометрическому составу и сложению.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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

ЛИТЕРАТУРА

- Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 450 с.
- Гиличинский Д.А. Сезонная криолитозона Западной Сибири. Москва: Наука, 1986. 144 с.
- Глобус А.М. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 279 с.
- Киссис Т.Я. Водный режим пахотных мерзлотных лесостепных почв. Москва: Наука, 1969. 134 с.
- Кравцов Ю.В. Миграция влаги и изменение профиля влажности почвогрунтов Ишимской степи в зимний период // Сибирский биологический журнал. 1992. № 6. С. 22–26.
- Кравцов Ю.В. Факторы зимнего передвижения влаги в пахотных почвах Ишимской степи // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024а. Том 54. № 8. С. 113–121. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-8-12>
- Кравцов Ю.В. Термоградиентное передвижение влаги в пахотных почвах юга Сибири // Степи Северной Евразии: материалы X международного симпозиума / под научной редакцией академика РАН А.А. Чибилёва. Оренбург: ИС УрО РАН, 2024б. С. 591–598. <https://doi.org/10.24412/cl-37200-2024-591-598>.
- Кравцов Ю.В., Смоленцева Е.Н. Особенности современного генезиса плакорных почв Ишимской степи // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. № 111. С. 116–156. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-116-156>
- Кристиан Г. Аналитическая химия / пер. с англ. А.В. Гармаша. Москва: Бином. Лаб. Знаний, 2009. 623 с.
- Куликов А.И., Панфилов В.П., Дугаров В.И. Физические свойства и режимы лугово-черноземных мерзлотных почв Бурятии. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 136 с.
- Лазарев Б.П., Шешенин С.В. Численное моделирование промерзания грунта с учетом переноса влаги // Наука и техника в дорожной отрасли. 2015. № 3(73). С. 27–30.
- Литвинова О.С. Влияние макроциркуляционных условий на атмосферное увлажнение юга и юго-востока Западной Сибири. Географический вестник. 2020. № 2(53). С. 100–110. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-2-100-110>
- Мосиенко В.С. Промерзание и оттаивание почвы в условиях Кулундинской степи // Почвоведение. 1957. № 1. С. 45–51.
- Невечеря В.Л. Сезонное промерзание почв и проблема мелиорации Барабы // Вопросы мелиорации Барабинской низменности. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1970. С. 89–93.
- Орловский Н.В. Исследование по генезису, солевому режиму и мелиорации солонцов и других засоленных почв Барабинской низменности // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1955. Том 47. С. 226–409.
- Панфилов В.П. Физические свойства и водный режим почв Кулундинской степи. Новосибирск: Наука, 1973. 258 с.

- Панфилов В.П., Слесарев И.В., Кудряшова С.Я., Сеньков А.А. Современное гидрологическое состояние почв и подстилающих пород // Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Наука, 1988. С. 47–57.
- Сеньков А.А. Водный режим гидроморфных и полугидроморфных почв Кулунды при промерзании // О почвах Сибири / к XI Межд. конгрессу почвоведов. Новосибирск: Наука, 1978. С. 187–191.
- Слесарев И.В., Кудряшова С.Я. Гранулометрический состав и водно-физические свойства почв и подстилающих пород // Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Наука, 1988. С. 39–47.
- Сребрянская Г.А. Явления сезонного промерзания и оттаивания почв Центральной Барабы // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1954. Том 42. Часть 2. С. 172–232.
- Танасиенко А.А., Чумбаев А.С. Условия формирования льдистого экрана в эродированных черноземах Западной Сибири // Почвоведение. 2010. № 4. С. 450–460.
- Фельдман Г.М. Перемещение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
- Шейн Е.В., Мазиров М.А., Зинченко С.И., Гончаров В.М., Корчагин А.А., Умарова А.Б., Милановский Е.Ю. Агрофизика. Владимир: Изд-во ВНИИСХ, 2016. 124 с.
- Deng M., Meng X., Lu Z., Zhao L., Hu Z., Chen H., Shang L., Wang Sh., Li Q. Impact and Sensitivity Analysis of Soil Water and Heat Transfer Parameterizations in Community Land Surface on the Tibetan Plateau // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2021. Vol 13. Iss. 9. e2021MS002670. <https://doi.org/10.1029/2021MS002670>
- Dopper V., Rocha A.D., Berger K., Granzig T., Verrelst J., Kleinschmit B., Forster M. Estimating soil moisture content under grassland with hyperspectral data using radiative transfer modelling and machine learning // International Journal of Applied Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 110. P. 102817. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102817>
- Gelfan A. Physically-based model of heat and water transfer in frozen soil and its parameterization by basic soil data // Predictions in Ungauged Basins: Promise and Progress (Proceedings of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 2006. 303. P. 293–304.
- Chalhoub M., Bernier M., Coquet Y., Philippe M. A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers // Renewable Energy. 2017. Vol. 103. P. 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.027>
- He M., Feng X., Li N. Modeling of Coupled Heat-Moisture Transfer and Deformational Behavior of Frozen Soil // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. Vol. 55. P. 153–161. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9519-z>
- Xu H., Spitler J.D. The relative importance of moisture transfer, soil freezing and snow cover on ground temperature predictions // Renewable Energy. 2014. Vol. 72. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.044>
- Zhu W., Zhang C.L., Chiu A.C.F. Chiu Soil-Water Transfer Mechanism for Solidified Dredged Materials // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2007. Vol. 133. Iss. 5. P. 588–598. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:5\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(588))

Поступила в редакцию 19.05.2025

Принята 23.06.2025

Опубликована 27.06.2025

Сведения об авторах:

Юрий Васильевич Кравцов – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры географии, регионоведения и туризма ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет» (г. Новосибирск, Россия); kravtsov60@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0462-9194>

Александр Петрович Рыжих – кандидат химических наук, доцент кафедры химии ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет» (г. Новосибирск, Россия); redryzhikh@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5326-2571>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Experimental study of thermogradient moisture migration in soil using a chemical marker

© 2025 Y. V. Kravtsov , A. P. Ryzhikh Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Vilyuyskaya St., Novosibirsk, Russia. E-mail: kravtsov60@mail.ru, redryzhikh@ya.ru

The aim of the study was to examine experimentally the thermogradient migration of moisture in soil using a chemical marker.

Location and time of the study. The study was conducted in the laboratory during February-May 2025.

Methods. The study of the redistribution of moisture under the influence of a temperature gradient was carried out in columns of bulk soil of different granulometric composition. The method of chemical labeling was used to identify the predominant form of migrating moisture. The chloride ion was used as a marker. To form a moisture profile in the model soils, similar to the distribution of water in highly moistened natural soils, the pairs of columns with a preset moisture content were kept for 14 days at room temperature. Then, the profile moisture distribution was determined in one of the columns of each pair. The second column, moistened with an aqueous chloride ion solution, was placed in a refrigeration unit and cooled from above to subzero temperatures. At the same time, a positive temperature was maintained in the lower parts of the experimental columns. After 14 days, the vertical distribution of moisture in the second columns was determined by the thermostatic-weighing method and the chloride-ion-Mohr method. Samples were taken at 2 cm increments in two replicates. Conclusions about the forms of moisture movement under the influence of a temperature gradient were made based on the layered distribution of chloride ion.

Results. The moisture profile of previously highly moistened soils at room temperature was established: it can be considered an analogue of the vertical distribution of moisture in the soil and soil strata of the southern regions of Siberia during the warm season. In loamy and sandy loamy variants at depths of 4-12 cm, a decrease in humidity by 1% and its increase in the 0-4 cm layer by 1-2% was noted. This change was probably due to the intra-soil evaporation of moisture and its accumulation at the front of the insulating film on the column surfaces. The moisture profile acquired similarities with the profile of highly moistened steppe soils of heavy loamy, highly silty granulometric composition in steam-bearing areas with groundwater below the critical depth. In the sand variants, a decrease in the moisture content in the 0-10 cm layer by 1.0–2.5% and a corresponding increase in humidity in the lower part of the columns were found. It was likely that some of the moisture moved to the lower part of the profile under the influence of gravity. As a result, the columns of the sandy soil showed similarities in their moisture profile with the profiles of natural soils with closely located groundwater.

As a result of cooling from above, moisture moved to the frozen layer from the lower part in all profiles. The greatest extent of moisture movement was noted in the sandy soil: it revealed an increase in moisture content in the frozen part by 5-10% and a decrease in humidity in the thawed part by 2-4%. As the granulometric composition of soils becomes heavier, the volume of moisture that migrated into them decreased. In terms of external features, the moisture profiles obtained were similar to the segment of the moisture profile of natural soils in the lower part of the freezing zone and the upper part of the permafrost-drying zone when groundwater is below the critical depth.

The uniformity of the vertical distribution of chloride ion in all experimental columns after their cooling was revealed. The profile distribution of chloride was characterized by a sharp increase in its content in the frozen part and a relatively uniform distribution in the thawed part of the profile. On this basis, we believe that liquid water participated in cryogenic migration in all previously highly moistened soils. The establishment of a layer-by-layer correlation between the moisture content and the chloride ion showed that liquid water plays the greatest role in the frosty redistribution of moisture in heavy loamy, highly moistened soil. At the same time, cryogenic migration of moisture in medium loamy and sandy soils is carried out not only in liquid form.

Conclusions. As a result of the work carried out, the humidity parameters, at which cryogenic migration of moisture is carried out mainly in a liquid state, were elucidated in the studied soils.

Keywords: bulk soil columns; humidity profile; thermogradient movement; chloride ion; cryogenic accumulation.

How to cite: Kravtsov Yu.V., Ryzhikh A.P. Experimental study of thermogradient moisture migration in soil using a chemical marker. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(2). e315. DOI: [10.31251/pos.v8i2.315](https://doi.org/10.31251/pos.v8i2.315) (in Russian with English abstract).

FUNDING

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

REFERENCES

Agrophysical characteristics of soils in Western Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1976. 450 p. (in Russian).

- Gilichinsky D.A. Seasonal cryolithozone of Western Siberia. Moscow: Nauka Publ., 1986. 144 p. (in Russian).
- Globus A.M. Physics of non-isothermal intra-soil moisture exchange. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 279 p. (in Russian).
- Kissis T.Ya. The water regime of arable permafrost forest-steppe soils. Moscow: Nauka Publ., 1969. 134 p. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Moisture migration and changes in the moisture profile of soils of the Ishim steppe in winter. Siberian Biological Journal. 1992. No. 6. P. 22–26. (in Russian).
- Kravtsov Yu.V. Factors of winter moisture movement in arable soils of the Ishim steppe. Siberian Herald of Agricultural Science. 2024a. Vol. 54. No. 8. P. 113–121. (in Russian). <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-8-12>
- Kravtsov Yu.V. Thermogradient movement of moisture in arable soils of southern Siberia. In book: Steppes of Northern Eurasia: proceedings of the Tenth International Symposium / scientific editing by A.A. Chibilyov, academician of RAS. Orenburg: IS UB RAS, 2024b. P. 591–598. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/cl-37200-2024-591-598>.
- Kravtsov Yu.V., Smolentseva E.N. Features of modern genesis of the Ishim steppe watershed plain soils. Dokuchaev Soil Bulletin. 2022. No. 111. P. 116–156. (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-116-156>
- Christian G. Analytical Chemistry / translated from English by A.V. Garmash. Moscow: Binom. Lab. Znanie, 2009. 623 p. (in Russian).
- Kulikov A.I., Panfilov V.P., Dugarov V.I. Physical properties and regimes of meadow-chernozem permafrost soils of Buryatia. Novosibirsk: Nauka Publ. Siberian Branch, 1986. 136 p. (in Russian).
- Lazarev B.P., Sheshenin S.V. Numerical simulation of the freezing process with regard for the water flow. Advanced Science and Technology for Highways. 2015. No. 3(73). P. 27–30. (in Russian).
- Litvinova O.S. The influence of macrocirculatory conditions on atmospheric humidification in the south and southeast of Western Siberia. Geographical bulletin. 2020. No. 2(53). P. 100–110. (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-2-100-110>
- Mosienko V.S. Freezing and thawing of the soil in the conditions of the Kulunda steppe. Pochvovedenie. 1957. No. 1. P. 45–51. (in Russian).
- Nevecherya V.L. Seasonal soil freezing and the problem of Baraba land reclamation. In book: Issues of land reclamation of the Baraba lowland. Novosibirsk: Nauka Publ. Siberian Branch, 1970. P. 89–93. (in Russian).
- Orlovsky N.V. Research on the genesis, salt regime and land reclamation of salt flats and other saline soils of the Baraba lowland. Proceedings of the V.V. Dokuchaev Soil Institute. 1955. Vol. 47. P. 226–409. (in Russian).
- Panfilov V.P. Physical properties and water regime of soils of the Kulunda steppe. Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. 258 p. (in Russian).
- Panfilov V.P., Slesarev I.V., Kudryashova S.Ya., Senkov A.A. Modern hydrological state of soils and underlying rocks. In book: Chernozems: properties and features of irrigation. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. P. 47–57. (in Russian).
- Senkov A.A. Water regime of hydromorphic and semi-hydromorphic soils of Kulunda during freezing. In book: On the soils of Siberia. To the XI International Congress soil scientists. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. P. 187–191. (in Russian).
- Slesarev I.V., Kudryashova S.Ya. Granulometric composition and water-physical properties of soils and underlying rocks. In book: Chernozems: properties and features of irrigation. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. P. 39–47. (in Russian).
- Srebryanskaya G.A. Phenomena of seasonal freezing and thawing of soils in Central Baraba. Proceedings of the V.V. Dokuchaev Soil Institute. 1954. Vol. 42. Part 2. P. 172–232. (in Russian).
- Tanasienko A.A., Chumbaev A.S. Conditions of the formation of ice barriers in eroded chernozems of Western Siberia. Eurasian Soil Science. 2010. Vol. 43. No. 4. P. 417–426. <https://doi.org/10.1134/S1064229310040071>
- Feldman G.M. Movement of moisture in thawed and freezing soils. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. 258 p. (in Russian).
- Shein E.V., Mazirov M.A., Zinchenko S.I., Goncharov V.M., Korchagin A.A., Umarova A.B., Milanovsky E.Yu. Agrophysics. Vladimir: VNIISKH Publishing House, 2016. 124 p. (in Russian).
- Deng M., Meng X., Lu Z., Zhao L., Hu Z., Chen H., Shang L., Wang Sh., Li Q. Impact and Sensitivity Analysis of Soil Water and Heat Transfer Parameterizations in Community Land Surface on the Tibetan Plateau. Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2021. Vol 13. Iss. 9. e2021MS002670. <https://doi.org/10.1029/2021MS002670>

Dopper V., Rocha A.D., Berger K., Granzig T., Verrelst J., Kleinschmit B., Forster M. Estimating soil moisture content under grassland with hyperspectral data using radiative transfer modelling and machine learning. *International Journal of Applied Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 110. P. 102817. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102817>

Gelfan A. Physically-based model of heat and water transfer in frozen soil and its parameterization by basic soil data. *Predictions in Ungauged Basins: Promise and Progress* (Proceedings of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 2006. 303. P. 293–304.

Chalhoub M., Bernier M., Coquet Y., Philippe M. A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. *Renewable Energy*. 2017. Vol. 103. P. 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.027>

He M., Feng X., Li N. Modeling of Coupled Heat-Moisture Transfer and Deformational Behavior of Frozen Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018. Vol. 55. P. 153–161. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9519-z>

Xu H., Spitler J.D. The relative importance of moisture transfer, soil freezing and snow cover on ground temperature predictions. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 72. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.044>

Zhu W., Zhang C.L., Chiu A.C.F. Chiu Soil-Water Transfer Mechanism for Solidified Dredged Materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2007. Vol. 133. Iss. 5. P. 588–598. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:5\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(588))

Received 19 May 2025

Accepted 23 June 2025

Published 27 June 2025

About the authors:

Yuri V. Kravtsov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Geography, Regional Studies and Tourism, Novosibirsk State Pedagogical University (Novosibirsk, Russia); kravtsov60@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0462-9194>

Alexander P. Ryzhikh – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry, Novosibirsk State Pedagogical University (Novosibirsk, Russia); redryzhikh@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5326-2571>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)