

## Формирование равновесного профиля влажности в дренируемом и недренируемом песчаном грунте

© 2026 Ю. В. Кравцов , А. П. Рыжих 

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет», улица Вилюйская, 28,  
г. Новосибирск, 630126, Россия. E-mail: [kravtsov60@mail.ru](mailto:kravtsov60@mail.ru); [reddyryzhikh@ya.ru](mailto:reddyryzhikh@ya.ru)

**Цель исследования.** Установить особенности формирования равновесного профиля влажности в дренируемом и недренируемом песчаном грунте.

**Место и время проведения.** Исследование проводили в лабораторных условиях в течение марта 2025 г. – февраля 2026 г.

**Методы.** Песчаный грунт отобран в пойме р. Обь. Для подтверждения передвижения влаги в грунте в жидком виде песок увлажняли водным раствором хлорида натрия; затем его помещали в колонки 7×7×20 см, изолированные от потерь влаги на испарение. Для выявления роли дренажа в формировании равновесного профиля половина колонок была снабжена дренажными отверстиями, а в другой половине колонок отверстия отсутствуют. Влагосодержание в грунте варьировало от 0,9 до 13,9% массы. Отбор проб грунта на влажность и содержание хлорид-иона проводили через 1, 3, 7, 14, 17, 20, 32, 42 и 50 дней после начала эксперимента. Влажность определяли термостатно-весовым методом, содержание хлорид-иона – методом Мора. Образцы грунта отбирали из каждого двухсантиметрового слоя в двукратной повторности. Заключение о перераспределении влаги делали на основании сравнения профилей влажности, полученных в разные сроки. Выводы о миграции влаги в жидком состоянии формулировали в результате анализа графиков корреляции между распределением влаги и хлорид-иона по профилю. Подтверждением установления равновесия профиля влажности служили стабильные значения влагосодержания в течение трех определений.

**Основные результаты.** При исходной влажности, превышающей уровень истинной наименьшей влагоемкости по А.А. Роде (1965), в дренируемых и недренируемых вариантах насыпного песчаного грунта экспериментально установлено перераспределение влаги сверху вниз в жидком виде. Через 42 дня опыта запасы влаги в слое 18–20 см составляли 200–300% аналогичных запасов в слое 0–2 см.

В недренируемом варианте профиль равновесия формировался в связи с заполнением стекающей влагой свободных пор в нижней части колонки и соответствующем повышении влагосодержания до 15%. С уменьшением исходной влажности, время установления равновесного профиля увеличивалось: при влажности выше 10% профиль устанавливался за 7–14 дней, при влажности 7,5–10% – за 14–32 дня.

В дренируемом варианте из-за длительного стекания влаги, содержащейся сверх уровня истинной наименьшей влагоемкости, образование равновесного профиля влажности было продолжительным. Установлено, что в насыпном песчаном грунте вертикальное перераспределение влаги становится невыраженным и равновесный профиль формируется при влажности менее 1,56%. Согласно расчетам, для образования такого профиля при исходной влажности 10% необходимо 165 суток.

**Заключение.** Определено влияние наличия/отсутствия дренажа на формирование равновесного профиля влажности в песчаном грунте. В недренируемом грунте профиль равновесия образуется в связи с заполнением пор влагой в нижней части экспериментальной колонки. При высокой исходной влажности такой профиль формируется за 1–2 недели; по мере снижения влажности продолжительность формирования профиля равновесия возрастает. В дренируемом грунте профиль равновесия образуется при прекращении вертикального перераспределения влаги при влажности менее 1,56%; при исходной влажности 10% для этого необходимо около полугода.

**Ключевые слова:** песчаный грунт; насыпные колонки; профиль влажности; перераспределение влаги; общая пористость; дренаж; хлорид-ион.

**Цитирование:** Кравцов Ю.В., Рыжих А.П. Формирование равновесного профиля влажности в дренируемом и недренируемом песчаном грунте // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 2. e357. DOI: [10.31251/pos.v9i2.357](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.357)

### ВВЕДЕНИЕ

Для песчаных грунтов, предварительно равномерно увлажненных по профилю, характерно последующее перераспределение влаги в направлении сверху вниз. Такое изменение влагосодержания фиксируется при неодинаковых температурных условиях и в течение разных промежутков времени (Кравцов, Рыжих, 2025а). Это явление известно как установление равновесного профиля влажности в

почвах и породах (Роде, 1965). Под равновесным профилем влажности почвы понимается такое его состояние, при котором распределение влаги по вертикали становится неизменным и не подвергается динамике во времени при стабильных внешних условиях (температуре приземного слоя атмосферы и поверхности почвы, состоянии биоценоза и т.д.). Наиболее отчетливо это явление прослеживается в почвенно-грунтовых толщах легкого гранулометрического состава. Вопрос о равновесном профиле влажности обычно возникает в связи с определением величин истинной наименьшей влагоемкости почв. Истинная наименьшая влагоемкость по А.А. Роде (1965), «характеризует некоторое среднее равновесное состояние подвешенной влаги, к которой стремится распределение последней в почвенном профиле ...» (с. 235) в автоморфных условиях и в гомогенных неслоистых грунтах.

Образование равновесного профиля влажности в связи с изучением форм влаги и механизмов ее передвижения в почвах и грунтах разного гранулометрического состава исследовали в течение первой половины XX столетия. А.А. Роде (1965) приведено описание и детальный анализ результатов, как собственных экспериментов, так и большого количества опытов коллег и предшественников, направленных на решение этих вопросов (опыты И.С. Васильева, Н.С. Орешкиной, В.А. Уласевича, С.И. Долгова, М.М. Абрамовой и многих других).

По результатам анализа этих экспериментов А.А. Роде (1965) представлены следующие обобщения о формах и механизмах передвижения влаги в почвах легкого гранулометрического состава. Если изначально высушенный среднезернистый песчаный грунт (с частицами от 1,0 до 0,10 мм) увлажнять сверху, вода сначала будет удерживаться в верхней части профиля силами капиллярной природы, являясь по своей сути капиллярно-подвешенной. По мере увеличения количества влаги наступит момент, когда почти вся она быстро стечет вниз. Если же песок характеризуется исходной влажностью более 4,2%, то первые же порции влаги, поступающие на его поверхность, сразу же начнут стекать вниз. После стекания основной массы капиллярно-подвешенной влаги в верхней части колонки останется небольшое количество воды (1/5–1/10 первоначального объема), уже не способной к стеканию, которое создаст одинаковое содержание влаги в верхней части колонки. Эта влажность и будет соответствовать истинной наименьшей влагоемкости песчаных почв. Эта влага содержится в форме изолированных друг от друга скоплений («манжет»), которые образуются в точках стыка почвенных частиц. Она удерживается капиллярными силами и является стыковой, капиллярно-подвешенной. В песчаных почвах, при небольшом количестве подвешенной влаги (до 2,5%), края менисков граничат друг с другом не смыкаясь. При этом дальнейшее увеличение влажности (до 4,2%) вызывает их смыкание и восстановление сплошности свободной воды. Стекающая влага перемещается в нижнюю часть профиля и, таким образом, в метровом слое песчаной колонки в течение 20 дней формируется профиль влажности с возрастающим влагосодержанием книзу.

Формирование равновесного профиля влажности в песчаных и супесчаных каштановых почвах Кулундинской степи рассмотрено в работе (Панфилов, Чащина, 1971), где указывается, что суть этого процесса состоит в постепенном стекании части влаги под влиянием гравитации при слабых капиллярных силах (из-за малого количества и крупных размеров капиллярных пор). Этот процесс при плотности почв 1,7 г/см<sup>3</sup> продолжается, по наблюдениям авторов, в течение 20 суток. Затем движение влаги прекращается, профиль влажности достигает равновесного состояния, а влагосодержание – истинной наименьшей влагоемкости (ее величина составляет, по В.П. Панфилову и Н.И. Чащиной (1971), 8,0–8,9% массы в слое 0–80 см каштановой почвы иловато-песчаного супесчаного гранулометрического состава).

В естественных условиях выявление равновесного состояния профиля влажности почв и подпочвенных пород и связанных с ним величин истинной наименьшей влагоемкости достаточно сложно в виду постоянного изменения температуры почвы и потребления влаги корневыми системами растений. По этой причине обычно используются величины наименьшей (полевой) влагоемкости, которые являются приближенными значениями истинной наименьшей влагоемкости.

С учетом представленных соображений в базе данных Научной электронной библиотеки e-library (<https://elibrary.ru/keywords.asp>, дата обращения 14.02.2026) не обнаружено публикаций в течение 1980–2020-х гг., посвященных установлению равновесного профиля влажности песчаных и супесчаных почвенно-грунтовых толщ. Профиль равновесия (равновесный профиль) является предметом изучения в морской и речной геоморфологии, в том числе, и в последние годы (Корзинин, Штремель, 2025; Хомчановский и др., 2025; и др.).

Таким образом, к настоящему времени имеются представления о формах влаги в почвах легкого гранулометрического состава и о механизмах ее передвижения при установлении равновесного профиля влажности при истинной наименьшей влагоемкости. Между тем, вопросы формирования

равновесного профиля влажности, соответствующего истинной наименьшей влагоемкости при наличии или отсутствии дренажа почв, являются еще недостаточно глубоко изученными. Эти вопросы представляется значимыми для богарного и поливного земледелия на степных песчаных почвах (Макарычев и др., 2024), познания процессов и механизмов передвижения влаги в пористых многокомпонентных средах (Смагин, 2021) и изучения термоградиентной миграции почвенно-грунтовой влаги (Агутин и др., 2025). Учитывая выдвинутые аргументы, важно провести лабораторные экспериментальные работы по установлению равновесного профиля влажности в почвенно-грунтовых толщах песчаного гранулометрического состава.

В почвах влага по вертикали распределена неравномерно в связи с влиянием гравитации, профильным размещением органического вещества, минеральных солей, общей пористости и т.д. В связи с обилием факторов, обуславливающих неравномерное распределение влаги по профилю почвы, на начальном этапе исследования представляется важным сосредоточить усилия на изучении формирования равновесного профиля влажности при постоянстве гранулометрического состава, для чего вместо реальной почвы можно использовать модельный грунт. Поскольку наибольший интерес вызывает формирование равновесного профиля влажности песчаных почв, в начале работ используем песчаный грунт. Так как установление равновесного профиля в грунте зависит от наличия или отсутствия дренажа, первым шагом в изучении этого явления представляется исследование влияния дренажа на формирование равновесного профиля влажности.

Цель исследования – установить особенности формирования равновесного профиля влажности в дренируемом и недренируемом песчаном грунте.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При изучении факторов формирования равновесного профиля влажности использованы колонки насыпного песчаного грунта, отобранного в пойме р. Обь среди свежих аллювиальных отложений в точке с координатами 54°02'36.84" с.ш. и 82°51'04.56" в.д. (Кравцов, Рыжих, 2025б). Гранулометрический состав грунта определен пипет-методом в модификации Н.А. Качинского (Шейн и др., 2016) и показан в таблице.

*Таблица*

Гранулометрический состав грунта

Глубина, м	Потеря 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
0,1–0,4	0,0	37,6	43,6	8,9	1,7	3,4	4,8	9,9

Для дальнейшей работы полезно иметь представление о наиболее значимых физических свойствах исследуемого грунта. Его общая пористость ( $\Pi$ ) определена через соотношение

$$\Pi = (1 - d_{\text{общ.}} / d_{\text{тв.}}) \times 100 \%,$$

где  $d_{\text{общ.}}$  – плотность сложения;  $d_{\text{тв.}}$  – плотность твердой фазы.

Плотность твердой фазы песка колеблется, как правило, от 2,67 до 2,71 г/см<sup>3</sup> (Тешева и др., 2025). Плотность насыпных колонок песчаного грунта в нашем случае составила 1,86 г/см<sup>3</sup>. В итоге общая пористость в экспериментальных колонках достигла приблизительно 30%. Такие величины пористости являются более низкими, чем в горизонте С песчаных и супесчаных почв Кулунды (36–38%, по Панфилову, Чащиной, 1971), что связано с бесструктурностью исследуемого грунта, обусловленной перемешиванием песка при подготовке насыпных колонок к эксперименту. Пористость нашего грунта близка к пористости «идеальной» почвы при гексагональной упаковке твердых частиц. Известно, что в почвах легкого гранулометрического состава, при условии окатанности частиц, поры по своей форме могут приближаться к порам «идеальной» почвы. Радиус наиболее узких проходов в «идеальной» почве составляет 0,155 R (радиуса) твердых частиц. В нашем случае песчаные частицы аллювиальных отложений достаточно близки по форме к окатанным и, следовательно, радиус наиболее узких пор между ними может колебаться от 3,9 мкм до 77,5 мкм, т.е. по своему диаметру (от 7,8 до 155 мкм) они характеризуются как поры капиллярного размера. Радиус наиболее крупных ромбоэдрических пор в «идеальной» почве составляет 0,414 R твердых частиц. В нашем случае диаметр таких пор колеблется от 21 до 415 мкм, что характеризует их как поры среднего (капиллярного) размера (Смагин, 2021). Преобладание средних пор в структуре пористости обуславливает благоприятные условия для

размещения в них капиллярной влаги (Чурзин, Дубовченко, 2020) и для нисходящего передвижения гравитационной воды в песчаном грунте.

Равновесные профили влажности устанавливаются, как в условиях свободного дренажа почвенно-грунтовой толщи, так и при его отсутствии. В южных районах Западной Сибири отмечается разная ситуация с дренажем почв и подпочвенных пород легкого гранулометрического состава: от возможности свободного стекания воды (при глубоком залегании грунтовых вод и водоупорных отложений) до отсутствия дренажа в случаях близкого к земной поверхности положения грунтовых вод. Поэтому для уточнения особенностей установления равновесного профиля влажности дренируемого и недренируемого грунта в экспериментальных колонках обеспечивали контрастные условия для миграции влаги за пределы профиля. В половине таких колонок для свободного стекания воды на их дне выполнена система отверстий диаметром от 0,5 до 1,5 мм, в другой половине колонок дренаж был исключен, стекающая влага накапливалась в их придонной части.

Изучение влияния наличия или отсутствия дренажа на формирование равновесного профиля влажности проводили в грунте, предварительно высушенном и обезвоженном при температуре 105°C в течение 24 часов. В дальнейшем экспериментальные колонки увлажняли неодинаково. Это актуально, например, для получения более отчетливых представлений о перераспределении талой снеговой влаги в верхней части профиля степных и лесостепных почв Западной Сибири, объем которой изменяется год от года. В качестве ориентира использованы литературные данные о наименьшей полевой влагоемкости песчаных и супесчаных почв южных районов Западной Сибири. Наименьшая влагоемкость песчаных и супесчаных почв, определяемая методом заливных площадей, достигает 9–11% массы почв (Агрофизическая ..., 1976). Поэтому колонкам песчаного грунта задавали различное исходное влагосодержание: 13,9; 12,7; 10,0; 9,7; 9,4; 8,3; 7,5; 3,4; 1,56 и 0,9% массы. Поскольку многие задаваемые значения влажности существенно превышали величину истинной наименьшей влагоемкости песчаных почв (порядка 2,5%, по А.А. Роде (1965)), ожидаемыми являлись процессы гравитационного стекания влаги.

Грунт увлажняли водным раствором хлорида натрия концентрацией 5 г/л. Хлорид-ион использован в качестве химического маркера для разграничения миграции влаги в жидком или газообразном состоянии, поскольку хлорид перераспределяется в пространстве только при движении жидкого носителя. Увлажненный грунт тщательно перемешивали, чтобы влагосодержание по всему его профилю стало равномерным, и помещали в колонки, со всех сторон защищенные от потерь влаги на испарение. Колонки размером 7×7×20 см располагали в защищенном от солнечных лучей месте при постоянной температуре +24°C (Кравцов, Рыжих, 2025в).

Отбор проб грунта на влажность и содержание хлорид-иона производили через 1, 3, 7, 14, 17, 20, 32, 42 и 50 дней после начала эксперимента. Влажность определяли термостатно-весовым методом (Шейн и др., 2016), содержание хлорид-иона – методом Мора (Кристиан, 2009). Отбор образцов из колонок осуществляли из каждого 2-см слоя в двукратной повторности. Заключение о перераспределении влаги делали на основании сравнения профилей влажности, полученных в разные сроки наблюдений. Выводы о миграции влаги в жидком или парообразном состоянии формулировали в результате анализа графиков корреляции между распределением влаги и хлорид-иона по профилю насыпных колонок грунта. Фрагментами равновесного профиля влажности считали неизменяющиеся в течение нескольких (не менее 3) определений значения влагосодержания в профилях влажности насыпных колонок песчаного грунта.

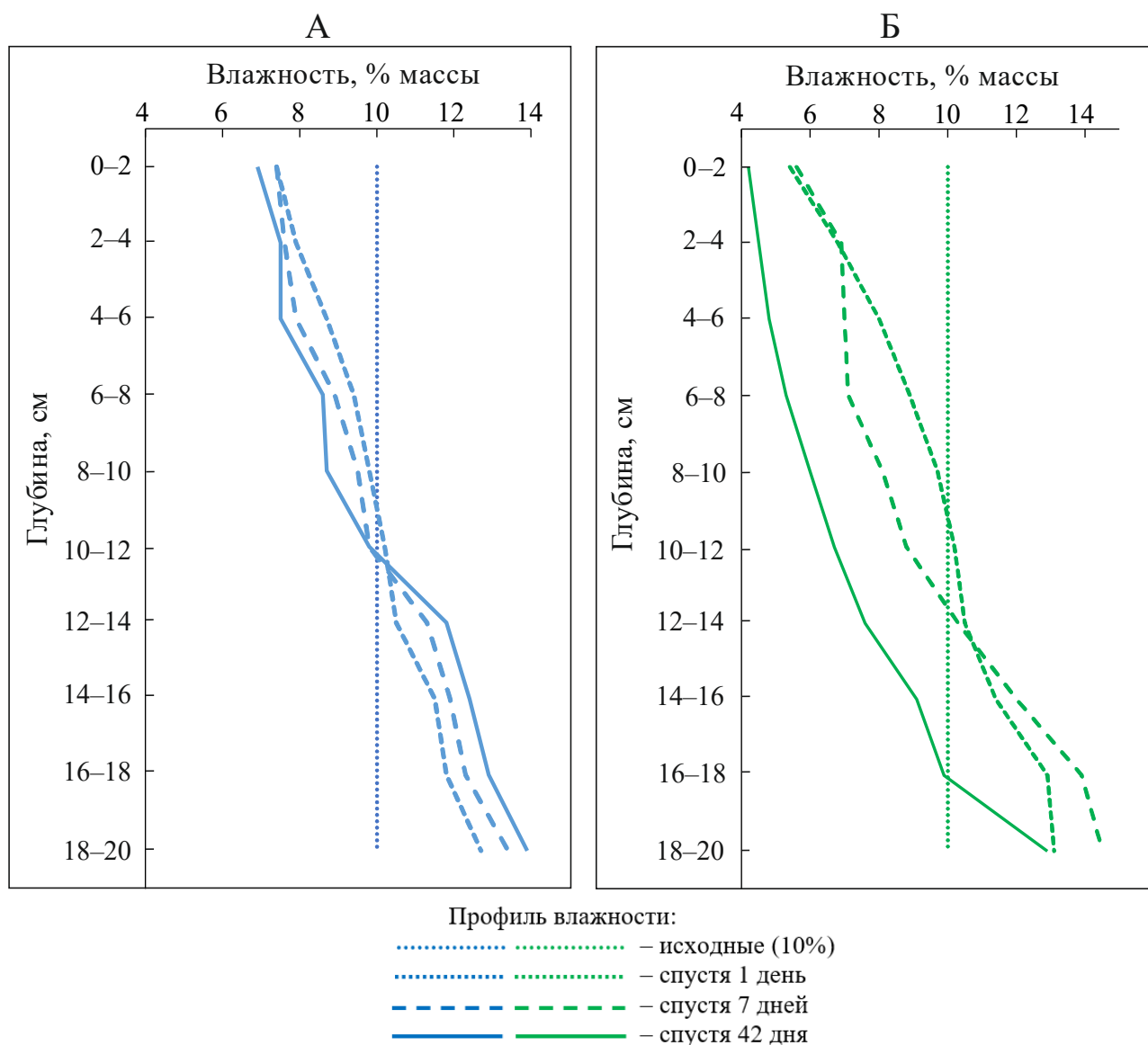
Организация экспериментальных работ, в целом, была подобной полевому опыту М.М. Абрамовой по удержанию подвешенной влаги в светло-каштановой тяжелосуглинистой почве в северо-западной части Прикаспийской низменности, результаты которого детально проанализированы А.А. Роде (1965). В отличие от опыта М.М. Абрамовой, наши эксперименты проведены в лаборатории с насыпными колонками песчаного грунта.

При обработке полученных данных использовали программу Microsoft Office Excel 2007.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перераспределение влаги в колонках отмечали и в дренируемых, и в недренируемых вариантах, поскольку заданные значения влажности в эксперименте превышали истинную наименьшую влагоемкость песчаного грунта, по А.А. Роде (1965). Влага по профилю обоих вариантов перераспределялась однотипно – ее содержание возрастало сверху вниз (рис. 1). В дренируемом варианте через 6 недель эксперимента содержание влаги в слое 18–20 см составляло 307% влагосодержания в слое 0–2 см, а в недренируемом варианте – 201%. Если для недренируемого грунта

такое увеличение очевидно, то повышение влажности книзу в дренируемом варианте связано с меньшей скоростью стока влаги за пределы профиля по дренажным отверстиям по сравнению с интенсивностью ее перераспределения по профилю.

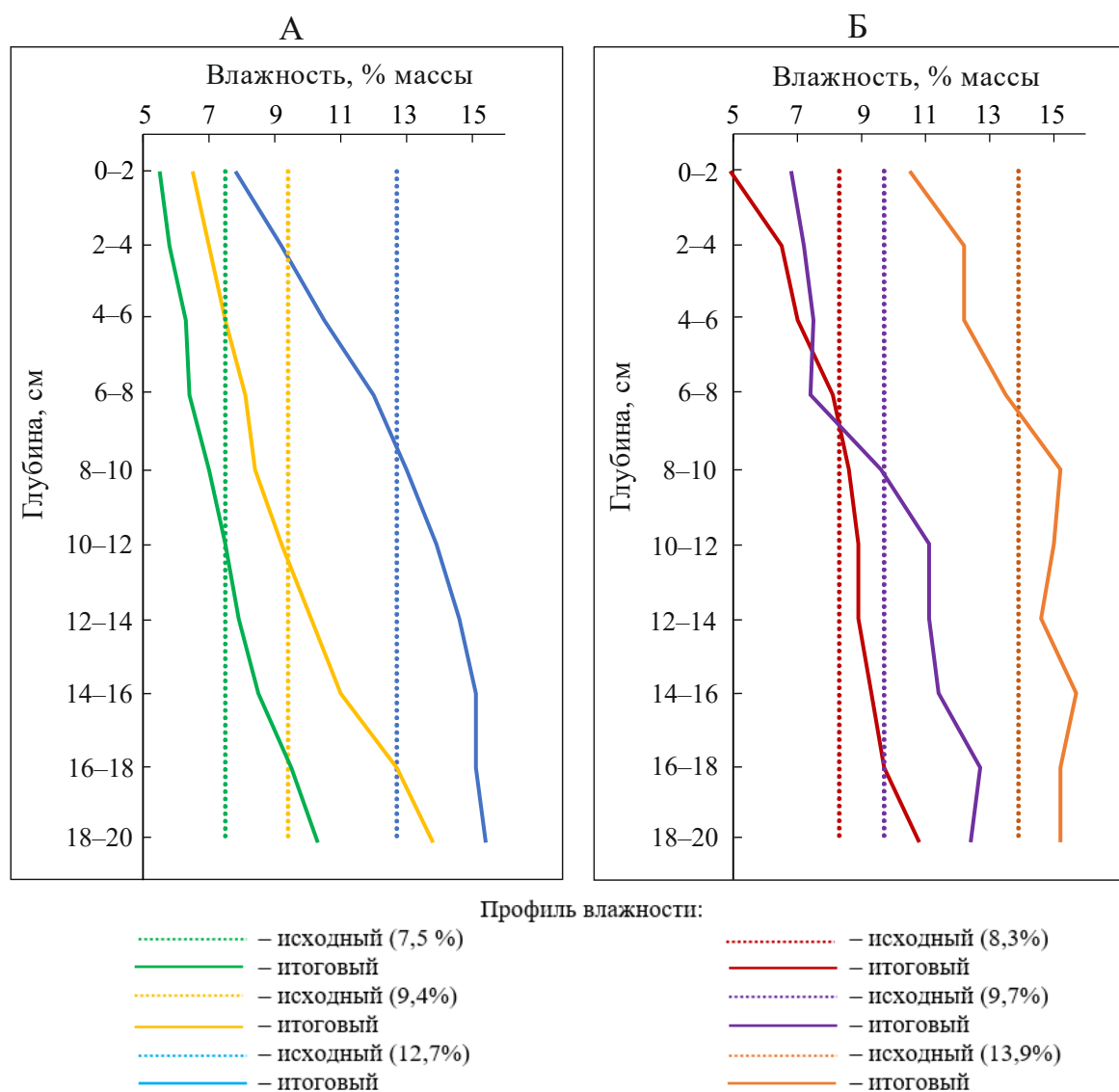


**Рисунок 1.** Динамика профиля влажности насыпных колонок песчаного грунта: А – недренируемый вариант; Б – дренируемый вариант.

Вследствие вертикального перераспределения влаги для обоих вариантов характерна дифференциация профиля влажности на зону ее снижения (в сравнении с исходным состоянием) и зону ее повышения (на фоне исходной). Вертикальная мощность зоны снижения влагосодержания в обоих вариантах со временем возрастала, а зоны повышения влажности – снижалась. Так, например, уже спустя 1 сутки зона снижения влагосодержания в обоих случаях отмечена в слое 0–10 см. Через 7 дней в обоих вариантах она выявлена в слое 0–12 см, и в слое 0–18 см в варианте с дренажем через 42 дня (см. рис. 1). Такая тенденция легко объясняется при допущении медленного стекания вниз части содержащейся в грунте влаги.

Заметные изменения профилей происходили в самом начале опыта. В варианте без дренажа в течение первых суток влажность в слое 0–2 см упала до 6,9% и позже практически не изменялась (через 42 дня эксперимента она составила 6,4%).

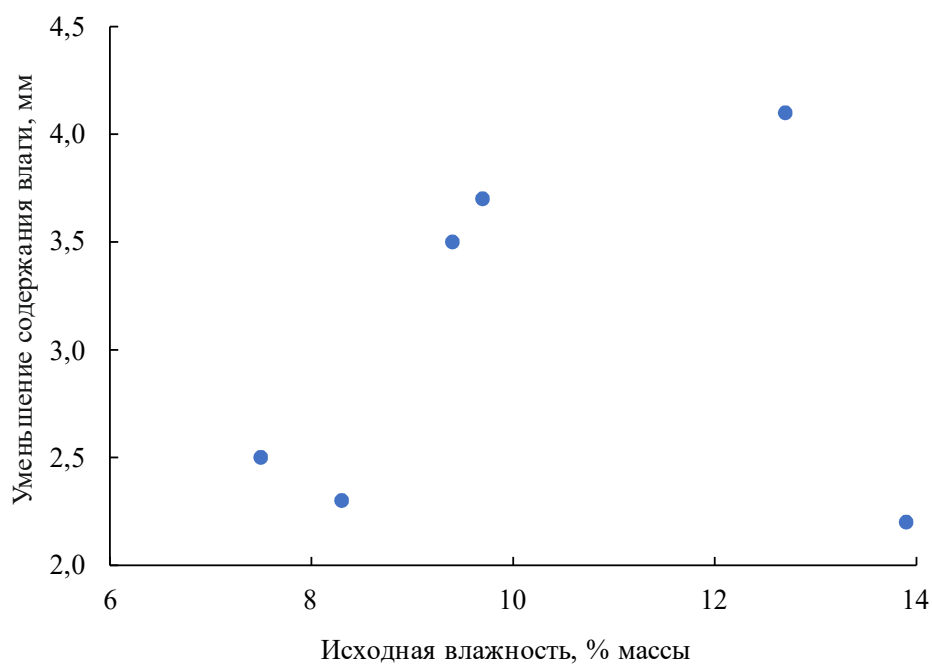
**Формирование равновесного профиля влажности в недренируемом варианте.** Влияние исходной влажности недренируемых колонок на ее перераспределение представлено на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Динамика профиля влажности недренлируемых насыпных колонок песчаного грунта в течение: А – одной недели; Б – двух недель.

В целом, в недренлируемых колонках по мере увеличения исходной влажности наблюдалось повышение объема перераспределяющейся влаги. Пропорциональность между исходной влажностью и объемом перемещения влаги из верхнего 10-сантиметрового слоя колонки в нижний продемонстрирована на рисунке 3.

На этой диаграмме рассеяния обращает на себя внимание ситуация с исходной влажностью 13,9%. При столь высокой влажности изменение влагосодержания оказывается несоразмерно малым: снижение содержания влаги в слое 0–10 см и, соответственно, прибавка в слое 10–20 см за 14 дней эксперимента составили всего 2,2 мм. Это связано с небольшой пористостью используемого в опыте грунта. При весовой влажности 13,9%, влагой занято 25,9% объема этого грунта, т.е. 86,3% объема пор. При увеличении влажности на 2,2% массы занимается еще 4,1% объема грунта и практически 100% объема пор. Проверим ограничивающее влияние пористости на перераспределение влаги на другом примере: при исходной влажности 12,7%, влагой занято 23,6% объема грунта или 78,7% объема пор, а прибавкой влаги в 4,1 мм заполняется практически весь остающийся еще свободным объем пор.



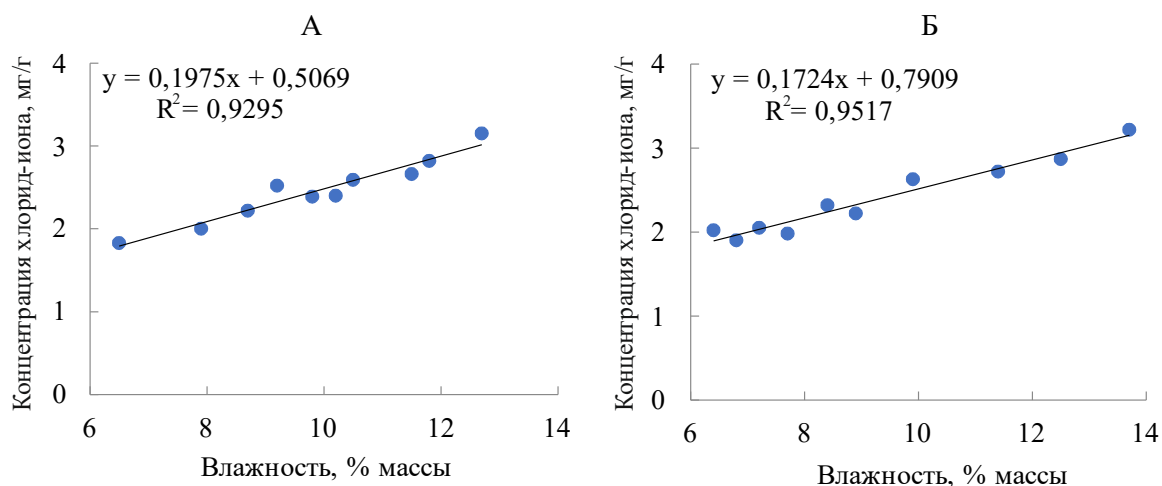
**Рисунок 3.** Пропорциональность между исходной влажностью и уменьшением содержания влаги в слое 0–10 см недренируемого варианта песчаного грунта.

Таким образом, учитывая пренебрежимо малое присутствие в бесструктурном песчаном грунте заземленного воздуха, высоким исходным влагосодержанием и небольшой по размерам прибавкой влаги занимается весь объем пор в насыпном грунте, чем и обусловлена невыраженность дальнейшего перераспределения влаги сверху вниз. В итоге, появляется основание говорить о завершении фиксируемого используемыми методами перераспределения влаги и о формировании признаков равновесного профиля влажности в недренируемом грунте. К этим признакам относятся: содержание влаги в нижней части недренируемого профиля, занимающее практически весь объем пор, и прекращение выраженного перераспределения влаги сверху вниз (Михеева и др., 2024). У основания колонок (на отметках 16–20 см) наблюдается резкое возрастание влажности (с 8,5–11,0 до 10,3–15,1% массы) (см. рис. 1А). По результатам нашего эксперимента, для формирования такого профиля влажности при исходном влагосодержании более 10% достаточно 7–14 дней. Следовательно, в недренируемом варианте профиль равновесия достигается при заполнении объема пор в нижней его части влагой, поэтому такой профиль можно дополнительно охарактеризовать как профиль заполнения.

Важно отметить, что в течение всего промежутка времени установления профиля равновесия в недренируемом варианте насыпного песчаного грунта перераспределение влаги осуществлялось, преимущественно, в жидком виде. В пользу этого свидетельствуют высокие величины достоверности аппроксимации пропорциональности между влажностью в новообразованных профилях влажности исследуемого грунта и концентрацией в нем хлорид-иона (рис. 4).

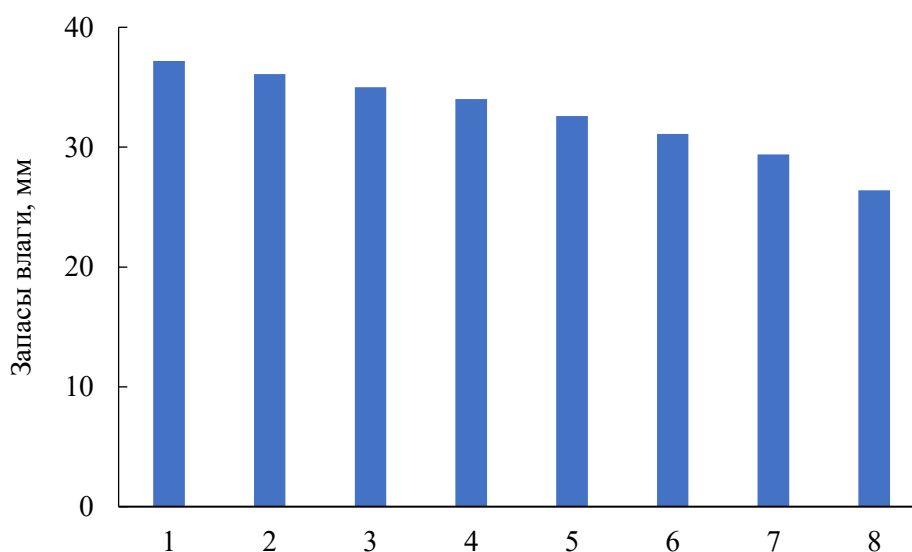
По мере снижения исходного влагосодержания, процесс формирования равновесного профиля влажности в недренируемых колонках песчаного грунта увеличивался во времени. При исходной влажности, например, 7,5 и 9,4% такое состояние профиля отмечено спустя 14–32 дня.

В итоге, уменьшение исходной влажности недренируемого песчаного грунта приводило к возрастанию продолжительности формирования равновесного профиля. При исходной влажности выше 10% признаки профиля равновесия проявлялись через 7–14 дней, а при влажности более 7,5% – спустя 14–32 дня в связи с заполнением свободных пор в нижней части профиля стекающей влагой и прекращением ее дальнейшего перераспределения.



**Рисунок 4.** Пропорциональность между влажностью грунта и концентрацией в нем хлорид-иона: один день (А) и семь дней (Б) после начала эксперимента. Недренируемая колонка.

**Формирование равновесного профиля влажности в дренируемом варианте.** Наиболее явным отличием дренируемого грунта является постепенное уменьшение в нем влагосодержания за счет расхода воды на сток за пределы профиля. При исходной влажности 10% массы запасы влаги в экспериментальной колонке грунта составляли 37,2 мм (рис. 5). Через 1 сутки после начала опыта потери влаги достигли 1,1 мм, а через 42 – 10,8 мм (29% исходных запасов).



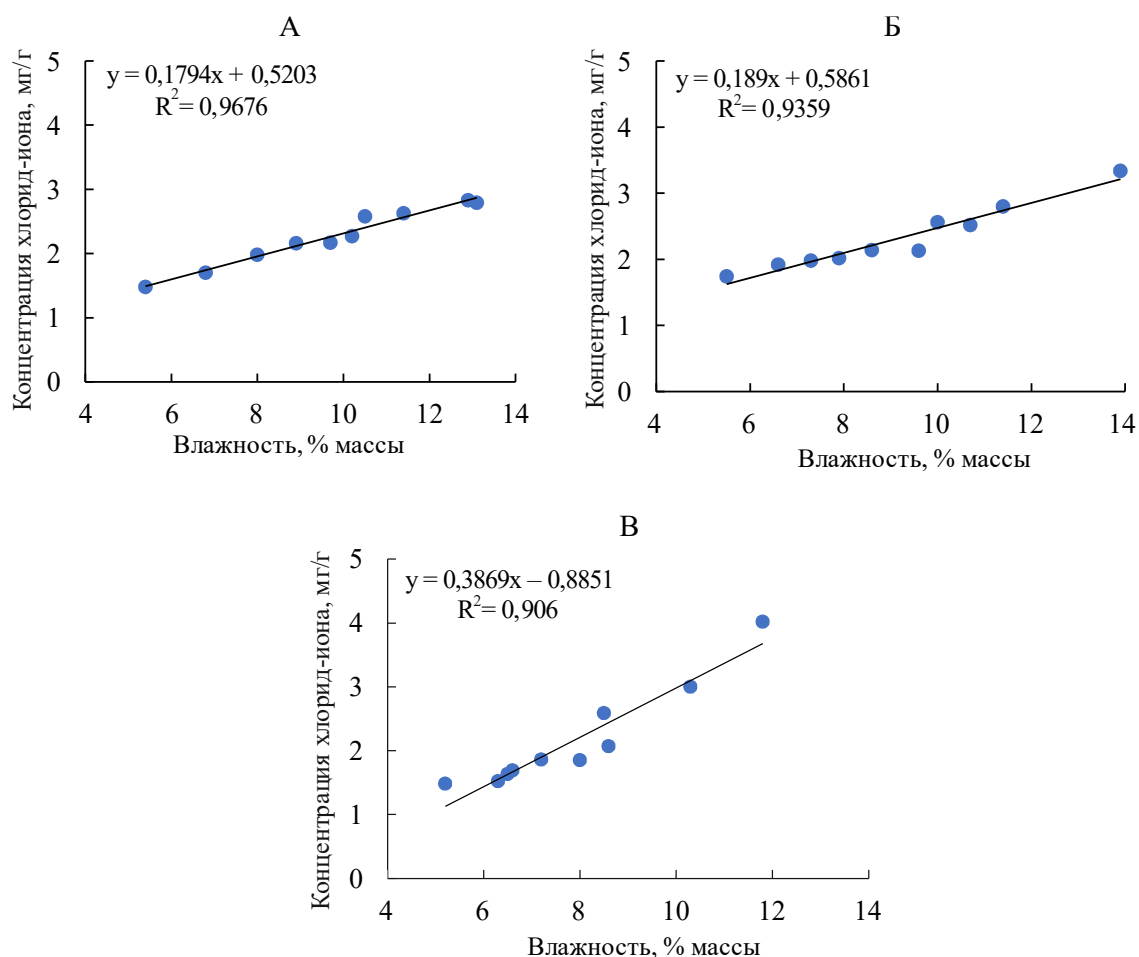
**Рисунок 5.** Динамика запасов влаги в дренируемых колонках грунта: 1 – исходные; спустя: 2 – 1 день; 3 – 3 дня; 4 – 7 дней; 5 – 17 дней; 6 – 20 дней; 7 – 32 дня; 8 – 42 дня.

Сравнение профилей влажности дренируемого варианта грунта спустя 42 и 50 дней после начала эксперимента показало дальнейшее снижение влагозапасов и продолжение перераспределения влаги. Для решения вопроса о времени, необходимом для установления равновесного профиля влажности в дренируемых колонках насыпного песка, нужно еще раз обратиться к вероятному механизму удержания влаги в песчаном грунте и ее передвижения, показанному ранее А.А. Роде (1965). В песчаном грунте, в гранулометрическом составе которого преобладают фракции размером 1–0,25 и 0,25–0,05 мм, суммарная поверхность твердых частиц относительно небольшая (18 м<sup>2</sup>/г, по Панфилову, Чащиной, 1971). Сорбционный механизм удержания влаги в такой ситуации выражен слабо, пленочной влаги не может быть много. В насыпной песчаной колонке грунта в составе пор преобладают средние поры, чем обусловлены благоприятные условия для удержания в нем капиллярной влаги. В точках контакта песчаных частиц возникают изолированные скопления влаги. Эти скопления (манжеты) удерживаются на контакте частиц капиллярными силами. С возрастанием

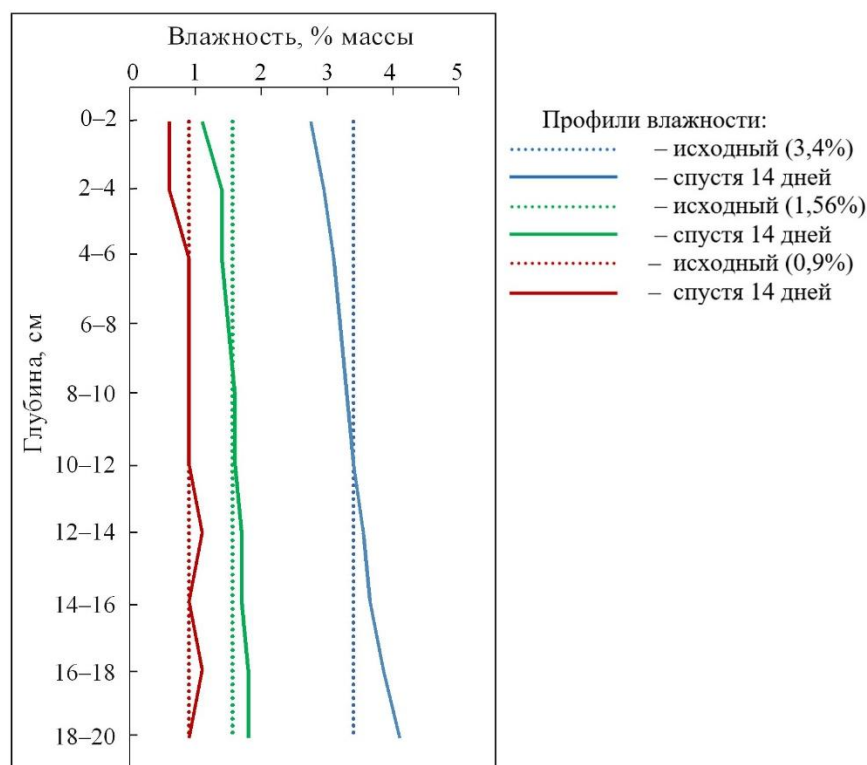
влажности размеры манжет увеличиваются. При достаточно высокой влажности (не менее 7% массы) влагой занято не менее 13% объема грунта или не менее 39% объема пор. Как известно, при объеме воды, занимающей 22,6% объема пор, возможна передача гидростатического давления, а, следовательно, переход воды в жидком состоянии из одной точки в другую.

Это теоретическое положение подтверждено результатами наших экспериментальных работ. В проведенных опытах при зафиксированном снижении влажности грунтов до 4,2% массы (что составляет 7,8% объема грунта или 23,4% объема пор), вертикальная миграция влаги в таком варианте осуществляется в жидком виде. Подтверждением этого является очень высокая пропорциональность между содержанием влаги в новообразованных профилях влажности экспериментального грунта и концентрацией в нем хлорид-иона (рис. 6).

Исходя из представленных выкладок, можно было бы предполагать, что передвижение влаги в жидком виде станет менее выраженным при снижении влажности песчаного грунта до 4,0% массы (что составляет 7,4% объема грунта или 22,3% объема пор). Однако заявленное число следует считать ориентировочным и в нашем случае явно завышенным, поскольку пористость экспериментального грунта все же превышает объем пор «идеальной» почвы. Наблюдениями установлено, что при исходной влажности 3,4% массы, равномерно распределенной по профилю насыпного песчаного грунта в недренируемой колонке, спустя 14 дней эксперимента профиль влажности заметно изменяется (рис. 7).



**Рисунок 6.** Пропорциональность между влажностью грунта и концентрацией в нем хлорид-иона: 1 день (А), 7 дней (Б) и 42 дня (В) после начала эксперимента. Дренируемая колонка.



**Рисунок 7.** Динамика профиля влажности насыпных колонок песчаного грунта. Недренируемый вариант.

Экспериментально установлено, что вертикальное перераспределение влаги в бесструктурном песчаном грунте с плотностью  $1,86 \text{ г/см}^3$  становится слабо выраженным при исходной влажности менее 1,56% массы. Именно при такой влажности в нашем опыте выявлены черты равновесного профиля влажности. Таким образом, полагаем, что при установленной влажности в экспериментальном песчаном грунте разрывается гидрологическая связь между отдельными манжетами капиллярной воды и, соответственно, миграция влаги под влиянием гравитации становится слабо выраженной. На этом основании считаем, что влажность 1,56% отражает истинную наименьшую влагоемкость исследуемого грунта.

По динамике запасов влаги в дренируемом грунте мощностью 20 см получена линейная пропорциональность изменения в нем влагосодержания в зависимости от продолжительности эксперимента:

$$y = -0,1814x + 35,891,$$

где  $y$  – запасы влаги (мм),  $x$  – продолжительность эксперимента (сутки).

Весьма высокая величина достоверности аппроксимации ( $R^2=0,9127$ ) позволяет предположить, что при неизменности выявленной тенденции запасы влаги снизятся до уровня 1,56% массы через 165 дней. При таких запасах подвижность влаги в заданных условиях резко уменьшается и устанавливается равновесный профиль влажности.

Известно (Роде, 1965), что между динамикой запасов влаги в профиле почв и продолжительностью опыта часто отмечается логарифмическая пропорциональность. По экспериментальным материалам получено следующее выражение:

$$y = -1,33\ln(x) + 35,415$$

Величина достоверности аппроксимации этой пропорциональности оказалась весьма значительной, но немного более низкой по сравнению с аналогичным показателем линейной пропорциональности –  $R^2=0,8654$ . На этом основании мы склонны считать первый вариант пропорциональности более достоверным.

По результатам наблюдений за динамикой влажности дренируемого грунта при исходном содержании влаги в 8,3%, основываясь на расчетах по формуле эмпирической пропорциональности

( $y = -0,0788x + 32,504$ ), предполагаем, что для достижения истинной наименьшей влагоемкости и, соответственно, профиля равновесия необходимо более 200 дней. Однако это заключение является предварительным; затронутый вопрос нуждается в дополнительном изучении.

В общем, наличие дренажа обуславливает не только потерю влаги из профиля, но и формирование профиля равновесия при достижении истинной наименьшей влагоемкости, т.е. равновесного профиля в его изначальном, классическом понимании. Такой профиль можно дополнительно охарактеризовать как профиль иссушения. В нем, в отличие от профиля заполнения в недренуемом варианте, вертикальное перераспределение влаги прекращается из-за понижения влажности до такого уровня, при котором, вероятно, разрывается гидрологическая связь между отдельными манжетами капиллярной воды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе экспериментальных работ изучали перераспределение влаги в дренируемой и недренуемой песчаной почвенно-грунтовой толще, предварительно увлажненной сверх истинной наименьшей влагоемкости до различного уровня. Это явление известно как формирование равновесного профиля влажности в почвах и грунтах легкого гранулометрического состава.

В результате вертикального перераспределения влаги через 42 дня эксперимента влажность слоя 18–20 см составила 307% влагосодержания в слое 0–2 см в дренируемом варианте и 201% в недренуемом.

В недренуемом варианте грунта установление профиля равновесия связано с заполнением влагой пор в нижней части экспериментальной колонки. Такое состояние отмечается спустя 7–14 дней при исходной влажности более 10% и спустя 14–32 дня при исходной влажности 7,5–10%. Для нижней части профиля равновесия в недренуемом варианте песчаного грунта характерен горизонт с повышенной (до 15%) влажностью.

В дренируемом варианте наличие дренажа обуславливает потерю влаги из профиля на сток. При исходной влажности 10% влагозапасы в грунте за 42 дня снизились на 29%. Наблюдениями установлено, что отчетливо различимое изменение влагосодержания по вертикали прослеживается при влажности до 1,56%; только при уменьшении ее ниже этого уровня устанавливается равновесный профиль. Расчеты показали, что в дренируемом варианте для снижения влажности до такого уровня за счет стока необходимо около полугода.

### ЛИТЕРАТУРА

Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 450 с.

Агутин К.А., Бровка Г.П., Дедюля И.В. Установки и методики исследования характеристик массопереноса и пучения при промерзании грунтов // Природопользование. 2025. № 1. С. 148–158. <https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-148-158>

Корзинин Д.В., Штремель М.Н. Морфодинамика песчаного дна под воздействием нелинейных свойств волн по данным эксперимента в волновом лотке // Океанологические исследования. 2025. Том 53. № 4. С. 23–44. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).2)

Кравцов Ю.В., Рыжих А.П. Экспериментальное изучение термоградиентной миграции влаги в грунте с использованием химического маркера // Почвы и окружающая среда. 2025а. Том 8. № 2. с315. <https://doi.org/10.31251/pos.v8i2.315>

Кравцов Ю.В., Рыжих А.П. Выявление механизма термоградиентной миграции влаги в грунтах с применением химического маркера // Международный научно-исследовательский журнал. 2025б. № 8(158). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.98>

Кравцов Ю.В., Рыжих А.П. Влияние термоградиентной миграции влаги на изменение концентрации растворимых веществ в грунте // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2025в. № 2(41).

Кристиан Г. Аналитическая химия / пер. с англ. А.В. Гармаша. Москва: Бином. Лаб. Знаний, 2009. 623 с.

Макарычев С.В., Гейфе И.В., Пивоварова Е.Г. О формировании температурно-влажностных полей в профиле чернозема обыкновенного под насаждениями рябины алой // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2024. № 2(232). С. 20–26. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-232-2-20-26>

Михеева О.В., Кравчук А.В., Орлова С.С., Миркина Е.Н., Панкова Т.А. Методология влияния свободной порозности и водоотдачи на процессы, происходящие в почвогрунтах оросительных каналов с земляным руслом // Природообустройство. 2024. № 1. С. 12–17. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-12-17>

Научная электронная библиотека e-library. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/keywords.asp> (дата обращения 14.02.2026).

Панфилов В.П., Чащина Н.И. Наименьшая влагоемкость супесчаных каштановых почв // Физика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1971. С. 61–77.

Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Том 1. Москва: Гидрометеиздат, 1965. 664 с.

Смагин А.В. Капиллярный эффект и влагоемкость полидисперсных пористых систем // Экологический вестник Северного Кавказа. 2021. Том 17. № 1. С. 4–18.

Тешева С.А., Осипов А.В., Наумова М.В. Оценка агрофизических свойств аллювиальных луговых почв агроценозов Кубани // Рисоводство. 2025. Том 24. № 3(68). С. 88–94. <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2025-68-3-88-94>

Хомчановский А.Л., Батанов Ф.И., Пинегина Т.К., Хубаева О.Р. Морфолитодинамика берегов острова Итуруп (Большая Курильская гряда) за историческое время по данным натурных исследований и моделирования // Геоморфология и палеогеография. 2025. Том 56. № 2. С. 262–282. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020062>

Чурзин В.Н., Дубовченко А.О. Влияние способов основной обработки на водно-физические свойства чернозема южного и урожайность гибридов подсолнечника // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 3(59). С. 181–189. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-18>

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.

Поступила в редакцию 16.02.2026

Принята 27.03.2026

Опубликована 08.04.2026

#### Сведения об авторах:

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

**Рыжих Александр Петрович** – кандидат химических наук, доцент кафедры химии ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет» (г. Новосибирск, Россия); [redryzhikh@ya.ru](mailto: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/)

## Formation of an equilibrium moisture profile in the drained and undrained sandy soil

© 2026 Yu. V. Kravtsov , A. P. Ryzhikh 

Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Vilyuyskaya St., Novosibirsk, Russia. E-mail: [kravtsov60@mail.ru](mailto:kravtsov60@mail.ru), [redryzhikh@ya.ru](mailto:redryzhikh@ya.ru)

**The aim of the study** was to reveal peculiarities of the formation of the equilibrium moisture profile in the drained and undrained sandy soil.

**Location and time of the study.** The study was conducted in a laboratory setting from March 2025 to February 2026.

**Methods.** Since various factors affect the vertical distribution of moisture in soils, it is important to study the formation of an equilibrium moisture profile solely under the influence of granulometric composition at the initial stage of the study. For this purpose, a sandy soil collected in the floodplain of the Ob River valley was used instead of the actual soil. To confirm the movement of moisture in this soil, the pre-dried sand was moistened to different levels with a 5 g/L aqueous solution of sodium chloride. The sand was then mixed to distribute the moisture evenly throughout the profile and placed in 7×7×20 cm columns, which were isolated to prevent moisture loss due to evaporation. To identify the role of drainage in the formation of the equilibrium moisture profile, half of the experimental columns were equipped with a drainage system, while the other half did not have such holes. The soil columns were given different initial moisture contents, ranging from 0,9 to 13,9% by weight. To determine the role of the time factor in the formation of the equilibrium profile, soil samples were taken for moisture content and chloride ion content at various intervals: 1, 3, 7, 14, 17, 20, 32, 42, and 50 days after the start of the experiment.

The moisture content was determined using the thermostatic-weight method, and the chloride ion content was determined using the Mohr method. Samples were taken from each two-centimeter layer in duplicates. The redistribution of moisture was determined by comparing the moisture profiles obtained at different times. The migration of moisture in liquid or vapor form was determined by analyzing the correlation graphs between the moisture and chloride ion distribution in the soil columns. The establishment of a moisture profile equilibrium was confirmed by the constant moisture content values during several (at least 3) measurements.

**Results.** In the case of initial moisture content exceeding the level of true lowest moisture capacity, the redistribution of moisture from top to bottom in liquid form was experimentally established in the drained and undrained variants of the bulk sand soil. After 42 days of the experiment, the moisture reserves in the 18–20 cm layer were 200–300% of the corresponding reserves in the 0–2 cm layer.

In the non-drained version, the equilibrium profile was formed due to the filling of free pores in the lower part of the column with draining moisture and a corresponding increase in the moisture content to 15%. As the initial moisture content decreases, the time required to establish the equilibrium profile increases: for moisture content above 10%, the profile was established within 7–14 days, and for the moisture content between 7.5 and 10% it took 14–32 days.

In the drained variant, due to the prolonged flow of moisture above the true lowest moisture capacity, the formation of an equilibrium moisture profile took a long time. In the loose sand soil the vertical redistribution of moisture became less pronounced, and an equilibrium profile was formed at a moisture content of less than 1.56%. According to calculations, it took 165 days to form such a profile at an initial moisture content of 10%.

**Conclusions.** The presence or absence of drainage was found to affect the formation of an equilibrium moisture profile in sandy soil. In the undrained version, the equilibrium profile is formed due to the filling of pores with moisture in the lower part of the experimental column. With a high initial moisture content, this profile is formed within 1–2 weeks; as the moisture content decreases, the duration of the equilibrium profile formation increases. In the drained version, the equilibrium profile is formed when the vertical redistribution of water in the profile stops at a moisture content of less than 1.56%. With an initial moisture content of 10%, this takes about six months.

**Keywords:** sandy soil; bulk soil columns; moisture profile; moisture redistribution; total porosity; drainage; chloride ion.

**How to cite:** Kravtsov Yu.V., Ryzhikh A.P. Formation of an equilibrium moisture profile in the drained and undrained sandy soil. *The Journal of Soils and Environment*. 2026. 9(2). e357. DOI: [10.31251/pos.v9i2.357](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.357) (in Russian with English abstract).

## REFERENCES

- Agrophysical characteristics of soils of Western Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1976. 450 p. (in Russian).
- Agutin K.A., Brovka G.P., Dedyulya I.V. Installations and methods for studying mass transfer and heaving characteristics during soil freezing. *Nature Management*. 2025. No. 1. P. 148–158. (in Russian). <https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-148-158>
- Korzinin D.V., Shtremel M.N. Morphodynamics of sandy bottom under the influence of nonlinear properties of waves based on the experiment in a wave flume. *Journal of Oceanological Research*. 2025. Vol. 53. No. 4. P. 23–44. (in Russian). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).2)
- Kravtsov Yu.V., Ryzhikh A.P. Experimental study of thermogradient moisture migration in soil using a chemical marker. *The Journal of Soils and Environment*. 2025a. Vol. 8. No. 2. e315. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v8i2.315>
- Kravtsov Yu.V., Ryzhikh A.P. Detection of the mechanism of thermogradient moisture migration in soils using a chemical marker. *International Research Journal*. 2025b. No. 8(158). (in Russian). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.98>
- Kravtsov Yu.V., Ryzhikh A.P. The effect of thermogradient migration of moisture on changes in the concentration of soluble substances in the soil. *Electronic Scientific and Methodological Journal of Omsk State Agrarian University*. 2025b. No. 2(41). (in Russian).
- Christian G. *Analytical Chemistry* / Translated from English by A.V. Garmash. Moscow: Binom. Lab. Znaniye, 2009. 623 p. (in Russian).
- Makarychev S.V., Gefke I.V., Pivovarova E.G. On temperature and moisture field formation in ordinary chernozem profile under plantations of mountain ash "Alaja krupnaja". *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2024. No. 2(232). P. 20–26. (in Russian). <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-232-2-20-26>
- Mikheeva O.V., Kravchuk A.V., Orlova S.S., Mirkina E.N., Pankova T.A. Methodology of influence of free porosity and water loss on the processes occurring in the soils of irrigation channel with an earth bed. *Prirodoobustrojstvo*. 2024. No. 1. P. 12–17. (in Russian). <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-12-17>

Scientific electronic library e-library. [Electronic resource]. URL: <https://elibrary.ru/keywords.asp> (accessed on 14.02.2026). (in Russian).

Panfilov V.P., Chashchina N.I. The Lowest Moisture Capacity of Sandy Chestnut Soils. In book: Soil Physics of Western Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1971. P. 61–77. (in Russian).

Rode A.A. Fundamentals of Soil Moisture Science. Vol. 1. Moscow: Gidrometeoizdat, 1965, 664 p. (in Russian).

Smagin A.V. Capillary effect and water capacity of polydisperse porous systems. The North Caucasus Ecological Herald. 2021. Vol. 17. No. 1. P. 4–18. (in Russian).

Tesheva S.A., Osipov A.V., Naumova M.V. Assessment of the agrophysical properties of alluvial meadow soils of Kuban agrocenoses. Rice Growing. 2025. Vol. 24. No. 3(68). P. 88–94. (in Russian). <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2025-68-3-88-94>

Khomchanovsky A.L., Batanov F.I., Pinegina T.K., Khubaeva O.R. Study of morpholithodynamics and modeling of coastal processes on Iturup island (Kuril islands). Geomorfologiya i Paleogeografiya. 2025. Vol. 56. No. 2. P. 262–282. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2949178925020062>

Churzin V.N., Dubovchenko A.O. Influence of basic soil treatment methods on water-physical properties of southern chernozem soils and yield of sunflower hybrids. Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. 2020. No. 3(59). P. 181–189. (in Russian). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-18>

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).

*Received 16 February 2026*

*Accepted 27 March 2026*

*Published 08 April 2026*

#### **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](mailto:kravtsov60@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0462-9194>

**Alexander P. Ryzhikh** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry at Novosibirsk State Pedagogical University (Novosibirsk, Russia); [redryzhikh@ya.ru](mailto: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/)