

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / BIOLOGICAL SCIENCES

Экология / Ecology

УДК 631.4: 551.435.537(571.56)

EDN: LJJIJM

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-3-431-443>



Оригинальная статья

Радиально-концентрическая гидрологическая структура аласных экосистем Центральной Якутии: роль латерального капиллярного подтока почвенной влаги

Виктор Семенович Макаров^{✉,1,2}, Григорий Николаевич Саввинов¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной экологии
Севера Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова,
проспект Ленина, 43, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
ул. Мерзлотная, 36, г. Якутск, 677010, Российская Федерация

✉ mvs379@yandex.ru

Аннотация

Аласные экосистемы Центральной Якутии представляют собой термокарстовые котловины, гидрологический режим которых принципиально отличается от аридных и субаридных ландшафтов. Это обусловлено уникальным сочетанием плоского дна, постоянно существующего внутрикотловинного озера и подстилающего слоя многолетнемерзлых пород, выполняющего функцию сплошного водоупора. В таких условиях традиционные модели вертикальной дифференциации почвенной влаги, основанные на формировании капиллярной каймы над уровнем грунтовых вод, теряют состоятельность: глубокие грунтовые воды здесь отсутствуют, а перенос влаги смещается из вертикальной плоскости в латеральную — от центрального озера к периферии котловины. В работе предложена модель формирования почвенной влаги, учитывающая латеральный влагоперенос и разработанная по результатам полевых исследований 2012–2013 гг. Для количественной идентификации гидрологического режима предложен диагностический подход, базирующийся на параметрах логарифмической зависимости плотность–влажность (угловой коэффициент k , константа C и коэффициент детерминации R^2). Высокие значения k и C соответствуют зоне капиллярного насыщения, умеренные — зоне динамического баланса, низкие — зоне атмосферного увлажнения. Прямые измерения потенциала почвенной влаги подтвердили наличие трех концентрических поясов с режимами от постоянного насыщения (Ψ от -5 до $-7,5$ кПа) до экстремального иссушения (Ψ до -981 кПа). Установлено, что выявленный гидрологический градиент выступает определяющим фактором пространственной организации почвенного и растительного покрова. Полученные результаты формируют методическую основу для долгосрочного мониторинга гидрологического режима аласных экосистем и оценки их устойчивости к природным и антропогенным воздействиям.

Ключевые слова: аласы, почвенная влага, потенциал влажности, многолетнемерзлые породы, латеральный влагоперенос

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России «Биота и абиотические компоненты экосистем Северо-Востока России и рациональное освоение природных ресурсов криолитозоны в условиях изменения климата и техногенного воздействия».

Для цитирования: Макаров В.С., Саввинов Г.Н. Радиально-концентрическая гидрологическая структура аласных экосистем Центральной Якутии: роль латерального капиллярного подтока почвенной влаги. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(3):431–443. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-3-431-443> EDN: LJJIJM

The radial-concentric hydrological structure of alas ecosystems in Central Yakutia: The role of lateral capillary soil-moisture flow

Viktor S. Makarov^{✉,1,2}, Grigoriy N. Savvinov¹

¹Research Institute of Applied Ecology of the North of the Ammosov North-Eastern Federal University, 43, Lenina Ave., Yakutsk, Russian Federation, 677007

²Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36, Merzlotnaya St., Yakutsk, Russian Federation, 677010

✉ mvs379@yandex.ru

Abstract

Alas ecosystems of Central Yakutia are thermokarst depressions whose hydrological regime differs fundamentally from that of arid and subarid landscapes. This distinction arises from a unique combination of a flat bottom, a permanently existing intradepression lake, and an underlying permafrost layer that acts as a continuous aquiclude. Traditional models of vertical soil moisture differentiation – based on the formation of a capillary fringe above the groundwater table – become untenable. Deep groundwater is absent here, and moisture transfer shifts from the vertical to the lateral plane, i.e., from the central lake toward the depression periphery. To address this, we propose a model of soil moisture formation that explicitly accounts for lateral water transfer and is grounded in field surveys conducted in 2012–2013. For quantitative identification of the hydrological regime, we introduce a diagnostic approach based on parameters of the logarithmic density–moisture relationship (slope coefficient k , constant C , and coefficient of determination R^2). High k and C values correspond to the capillary saturation zone, moderate values indicate the dynamic balance zone, and low values characterize the atmospheric wetting zone. Direct measurements of soil water potential confirmed the existence of three concentric belts, with regimes ranging from permanent saturation (Ψ from -5 to -7.5 kPa) to extreme desiccation (Ψ down to -981 kPa). The revealed hydrological gradient was found to be the primary factor controlling the spatial organization of both soil and vegetation cover. Collectively, these findings provide a methodological basis for long-term monitoring of the hydrological regime in alas ecosystems and for assessing their resilience to natural and anthropogenic pressures.

Keywords: alas, soil moisture, water potential, permafrost, lateral moisture transfer

Funding. This research was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Biota and abiotic components of ecosystems in the North-East of Russia and the rational development of natural resources of the permafrost zone under conditions of climate change and technological impact.”

For citation: Makarov V.S., Savvinov G.N. The radial-concentric hydrological structure of alas ecosystems in Central Yakutia: The role of lateral capillary soil-moisture flow. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(3):431–443. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-3-431-443> EDN: LJJIJM

Введение

Классические модели распределения почвенной влаги в аридных и субаридных ландшафтах, широко представленные в литературе [1, 2], основаны на принципе вертикальной гидрологической дифференциации. В условиях глубокого залегания грунтовых вод формируется стандартный профиль, включающий зону аэрации и нижележащую капиллярную кайму. Эта парадигма, детально изученная на различных объектах Евразии – от сухих степей и песчаных массивов до территорий с мощной капиллярной каймой и активным засолением [3–5], оказывается непримени-

ма к аласным экосистемам Центральной Якутии. Находясь в условиях резко-континентального климата и наличия многолетней мерзлоты, для которых характерны признаки криоаридности, аласы представляют собой уникальную модельную систему, не укладывающуюся в классические схемы. Их гидрологический режим кардинально перестраивается под влиянием двух ключевых факторов: 1) наличия постоянного источника влаги в центре котловины (аласного озера) и 2) повсеместного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), выполняющих роль сплошного водоупора. Несмотря на сезонное протаивание

деятельного слоя, мерзлая толща, расположенная непосредственно под ним в течение всего теплого периода, создает непреодолимый барьер для вертикальной инфильтрации. Это фундаментальное геокриологическое условие в сочетании с плоским дном аласных ландшафтов кардинально меняет вектор влагопереноса, делая невозможным формирование классической вертикальной гидрологической дифференциации.

В этих условиях закономерно предположить, что ведущим механизмом увлажнения приозерных территорий становится внутрипочвенный латеральный капиллярный подток влаги от центрального озера к периферии. По нашим наблюдениям, этот процесс и приводит к формированию не вертикального, а радиально-концентрического гидрологического градиента, проявляющегося на поверхности аласных котловин в виде серии концентрических поясов с различным водным режимом. Несмотря на свою логичность, эта гипотеза до сих пор не получила комплексного количественного подтверждения, основанного на репрезентативных полевых измерениях, одновременно характеризующих как запасы влаги, так и ее потенциал.

Таким образом, проблемой настоящего исследования является отсутствие адекватной концептуальной гидрологической модели, количественно верифицированной на основе репрезентативных полевых данных, адекватно объясняющей пространственно-временное распределение влаги в аласных экосистемах.

Цель работы – выявление механизмов формирования концентрической гидрологической структуры аласов на основе комплексного анализа полевых данных. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить пространственно-временную динамику плотности сложения и весовой влажности почв в трех концентрических поясах аласа (нижнем приозерном, среднем и верхнем периферийном).

2. Оценить характер и стабильность статистической связи между плотностью и влажностью почвы как потенциального индикатора гидрологического режима.

3. Количественно оценить динамику потенциала почвенной влаги для прямой проверки гипотезы о латеральном капиллярном подтоке и существовании концентрических гидрологических поясов в условиях межгодовой изменчивости атмосферных осадков.

Материалы и методы

Полевые исследования проводились в летние сезоны 2012–2013 гг. на изолированном аласе «Ат ыытар», расположенном в центральной части Республики Саха (Якутия) на территории Чурапчинского улуса (координаты: 62°10'16" N, 131°55'59" E).

В физико-географическом отношении район относится к юго-восточной части Центрально-Якутской низменности в пределах Лено-Амгинского междуречья и приурочен к Абалахской эрозионно-аккумулятивной террасе. Для территории характерны абсолютные высоты 201–219 м над уровнем моря и повсеместное развитие типичного аласного рельефа, сформированного интенсивными термокарстовыми процессами [6]. Район характеризуется резко-континентальным бореальным климатом с экстремальными годовыми амплитудами температур (до 100 °C) и низким количеством осадков (250–300 мм/год), что позволяет отнести его к зоне недостаточного увлажнения [7, 8]. Ключевым фактором, определяющим гидрологические и почвообразовательные процессы, является распространение сплошных многолетнемерзлых пород, выполняющих роль абсолютного водоупора и кардинально меняющих вектор влагопереноса. Данные многолетних наблюдений на сопредельных территориях показывают, что для аласных ландшафтов Центральной Якутии, к которым относится изучаемый объект, характерна повышенная мощность сезонно-талого слоя (СТС) по сравнению с зональными лесными экосистемами. В пределах Абалахской террасы, в зависимости от типа почв, микроклимата котловин и высоты снежного покрова, мощность СТС варьирует от 1,2 до 3,2 м, достигая максимумов в аномально теплые периоды [9–12]. Указанный диапазон полностью соответствует общему геокриологическому фону района исследований и подтверждает, что выбранный алас «Ат ыытар» является репрезентативной моделью для изучения гидрологических процессов в условиях глубоко протаивающего деятельного слоя над сплошным мерзлотным экраном.

Климатические условия в конкретные годы исследований продемонстрировали высокую межгодовую контрастность режима увлажнения (табл. 1), что позволило проверить устойчивость выявленных гидрологических закономерностей. Согласно данным архива метеостанции «Чурапча» (gr5.ru), расположенной в 30 км от объекта исследования,

Таблица 1

Суммы атмосферных осадков (мм) в период полевых исследований в сравнении со среднемноголетними значениями

Table 1

Amounts of atmospheric precipitation (mm) during the field research compared with the long-term average values

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Σ (май–сентябрь)
2012	10,8	9,2	28,4	74,4	22,3	147,1
2013	54,3	88,4	92,4	23,2	73,8	332,1
Ср. мн. (2006–2025)	22,5	34,8	45,2	49,1	35,7	187,3

Примечание. Ср. мн. – среднее многолетнее значение за период 2006–2025 гг. (n = 20). Данные по метеостанции «Чурапча» (rp5.ru).

Note. Ср. мн. – long-term average value for the period 2006–2025 (n = 20). Data from the Churapcha weather station (rp5.ru).

2012 год характеризовался выраженным дефицитом осадков в первую половину лета, тогда как 2013 год был аномально влажным. Сумма осадков за ключевые месяцы исследований (июнь–июль) в 2013 г. (180,8 мм) превысила показатель 2012 г. (37,6 мм) более чем в 4,8 раза и значительно превосходила среднемноголетнюю норму для данного периода, рассчитанную за последние 20 лет.

Объектом исследований служил алас «Ат-ыттар» (рис. 1), представляющий собой термокарстовую котловину округлой (каплевидной) формы площадью 7,5 га и глубиной около 5–6 м. Центр котловины занят мелководным озером с площадью зеркала, колеблющейся в зависимости от количества атмосферных осадков, в среднем около 3 га. В настоящее время алас огорожен

и используется в качестве сенокосного угодья с кратковременной пастбищной нагрузкой весной и осенью.

Исследования проводились на трех ключевых участках, соответствующих концентрическим гидротермическим поясам аласа:

1. Нижний пояс: пояс избыточного увлажнения, приуроченный к приозерной зоне. Характеризуется сообществами гигрофитов, с доминированием полевницы побегообразующей (*Agrostis stolonifera*).

2. Средний пояс: пояс оптимального увлажнения, занимающий центральную часть плоского дна. Представлен высокопродуктивными мезофильными лугами разнотравно-бескильничевого типа (с *Puccinellia tenuiflora* и *Elytrigia repens*).

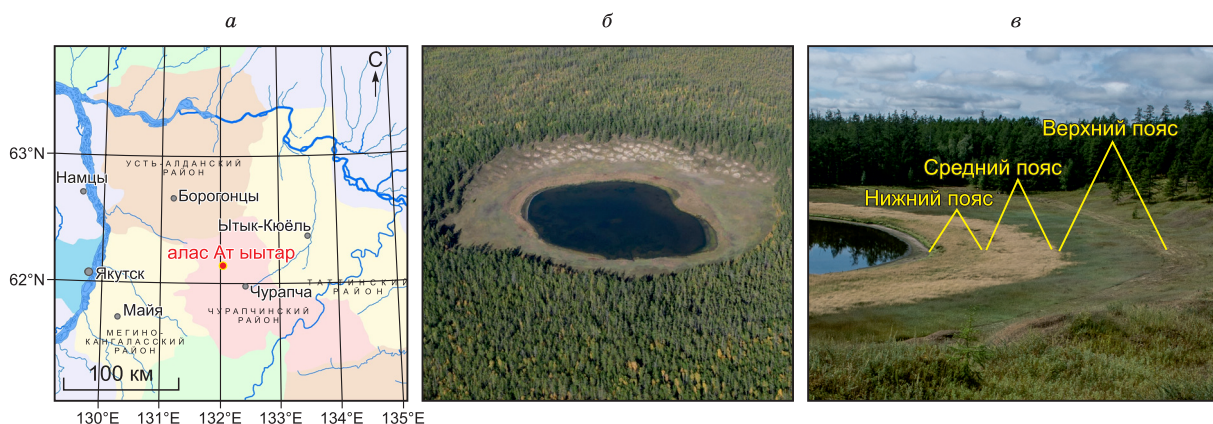


Рис. 1. Локализация и общий вид района исследований.

а – схема расположения аласа «Ат-ыттар» в системе Лено-Амгинского междуречья; б – общий вид аласной котловины (снимок с БПЛА); в – панорамная съемка, демонстрирующая концентрическое распределение растительных поясов. Фото В.С. Макарова

Fig. 1. Location and general overview of the study area.

а – Location map of the At-Yytar alas within the Lena-Amga interfluvium system; б – General view of the alas basin (UAV image); в – Panoramic view showing the concentric distribution of vegetation belts. Photos by V.S. Makarov

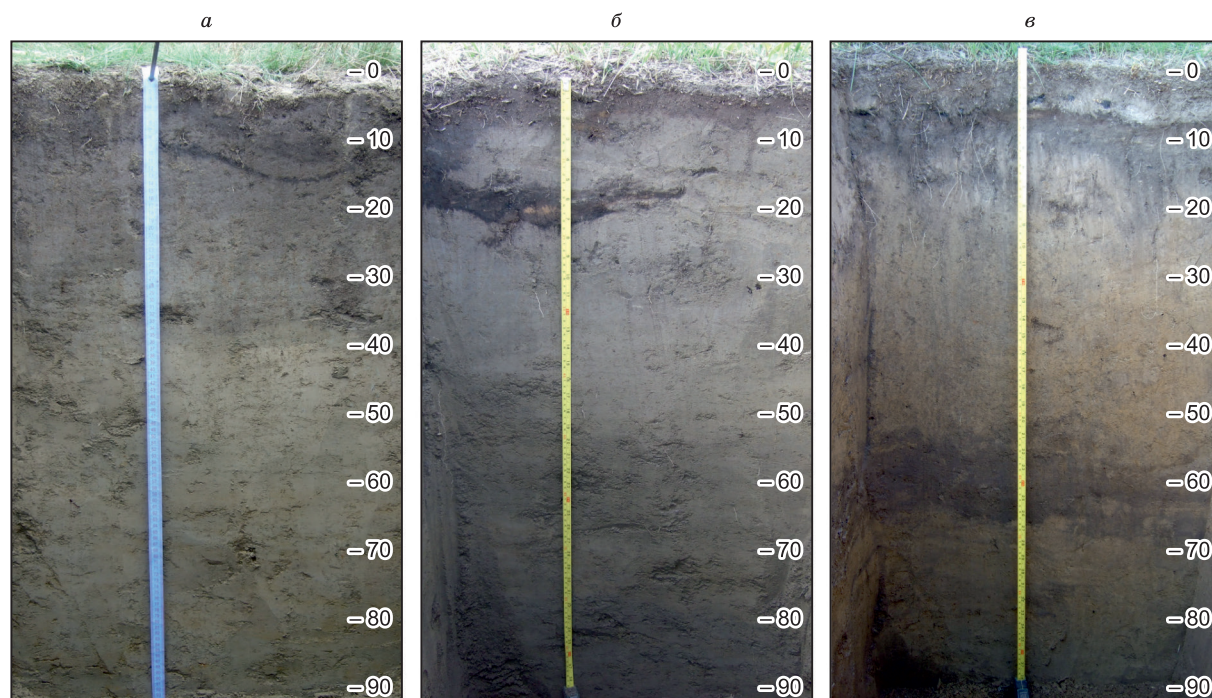


Рис. 2. Профили мерзлотных аласных болотных (а), луговых (б) и остепненных (в) почв. Фото В.С. Макарова

Fig. 2. Soil profiles of cryogenic alas bog (a), meadow (б), and steppified (в) soils. Photos by V.S. Makarov

3. Верхний пояс: пояс недостаточного увлажнения, расположенный на периферии котловины у подножия бортов. Занят остепненными разнотравно-пырейными группировками (с *Elytrigia repens* и ксерофитным разнотравьем).

На каждом участке исследовались мерзлотные аласные почвы (болотные, луговые и остепненные), сформированные на легких и средних суглинках с доминированием фракций крупной пыли и мелкого песка (рис. 2).

Изолированность котловины, отсутствие внешних водотоков, плоский рельеф днища и наличие мерзлого водоупора создают уникальные условия, в которых классические модели вертикального распределения влаги не применимы, что делает данный объект репрезентативной моделью для изучения латеральных процессов формирования почвенной влаги.

Для анализа пространственно-временной динамики свойств почв в каждом из трех поясов нами был заложен ряд площадок. Отбор образцов проводился в ключевые периоды вегетационного сезона: июнь, июль и сентябрь 2012 и 2013 годов.

На каждой площадке послойно, на глубинах 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 и 30–40 см производился отбор почвенных образцов методом режущего

кольца (объемом 50 см³) в двукратной повторности. Одновременно отбирались пробы на весовую влажность. Общее количество проанализированных образцов составило 180 образцов на плотность и столько же на влажность. Плотность сложения (г/см³) определялась весовым методом путем высушивания монолита до постоянной массы при температуре 105 °С. Весовая влажность (%) рассчитывалась как отношение массы потерянной влаги к массе абсолютно сухой почвы.

Для прямой верификации гипотезы о латеральном влагопереносе в период с 19 июня по 22 июля 2013 г. в каждом из трех поясов были установлены датчики водного потенциала MPS-2 (Decagon Devices, США), подключенные к накапливающему регистратору ЕМ50. Датчики были установлены на глубинах 10, 40 и 70 см, что позволило охарактеризовать динамику в верхних и более глубоких слоях почвы. Регистрация данных проводилась с 4-часовым интервалом, что обеспечило непрерывный временной ряд потенциала почвенной влаги (Ψ, кПа).

Для каждого сочетания дата–пояс была построена регрессионная модель, описывающая зависимость весовой влажности (W, %) от плотности сложения (ρ, г/см³). На основе визуального анализа диаграмм рассеяния и проверки условий

адекватности была выбрана логарифмическая модель вида $W = -k \cdot \ln(\rho) + C$.

Для каждой модели рассчитывался коэффициент детерминации (R^2), характеризующий долю изменчивости влажности, объясняемой изменчивостью плотности. Анализ проводился с использованием пакета анализа Microsoft Excel. Для оценки значимости различий между поясами по влажности и плотности использовался дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим пост-хок тестом Тьюки.

Результаты и обсуждение

Дисперсионный анализ (ANOVA) выявил статистически значимые различия между поясами по влажности ($F = 26,277$; $p = 1,26E-10$) и плотности ($F = 8,485$; $p = 0,000312$). Пост-хок анализ Тьюки подтвердил значимость всех попарных различий по влажности: верхний–средний ($\Delta = -5,77$ %; $p < 0,05$), верхний–нижний ($\Delta = -21,17$ %; $p < 0,001$), средний–нижний ($\Delta = -15,40$ %; $p < 0,001$). Для плотности значимые различия выявлены между верхним и средним ($\Delta = -0,192$ г/см³; $p < 0,001$) и верхним и нижним ($\Delta = -0,145$ г/см³; $p < 0,01$) поясами, тогда как разница между средним и нижним поясами была статистически незначимой ($\Delta = 0,047$ г/см³;

$p > 0,05$). Установлен четкий градиент увеличения влажности от верхнего пояса ($25,95 \pm 12,29$ %) через средний ($31,72 \pm 11,82$ %) к нижнему ($47,12 \pm 21,46$ %). Плотность достигала максимума в среднем поясе ($1,159 \pm 0,240$ г/см³) при минимальных значениях в верхнем ($0,967 \pm 0,262$ г/см³).

Полевые измерения выявили значительную пространственную и временную вариабельность как плотности сложения, так и весовой влажности почв в пределах аласной котловины. Анализ данных показал, что в пределах каждого гидрологического пояса наблюдается зависимость между этими параметрами, которая различается по своему характеру и стабильности (рис. 3, табл. 2).

Статистический анализ выявил устойчивую зависимость между весовой влажностью и плотностью сложения, которая описывается логарифмическим уравнением $W = -k \cdot \ln(\rho) + C$, где W – весовая влажность (%), ρ – плотность сложения (г/см³), k – угловой коэффициент, C – константа. Параметры этого уравнения обладают самостоятельной диагностической ценностью, выступая количественными индикаторами режима увлажнения и влагопереноса.

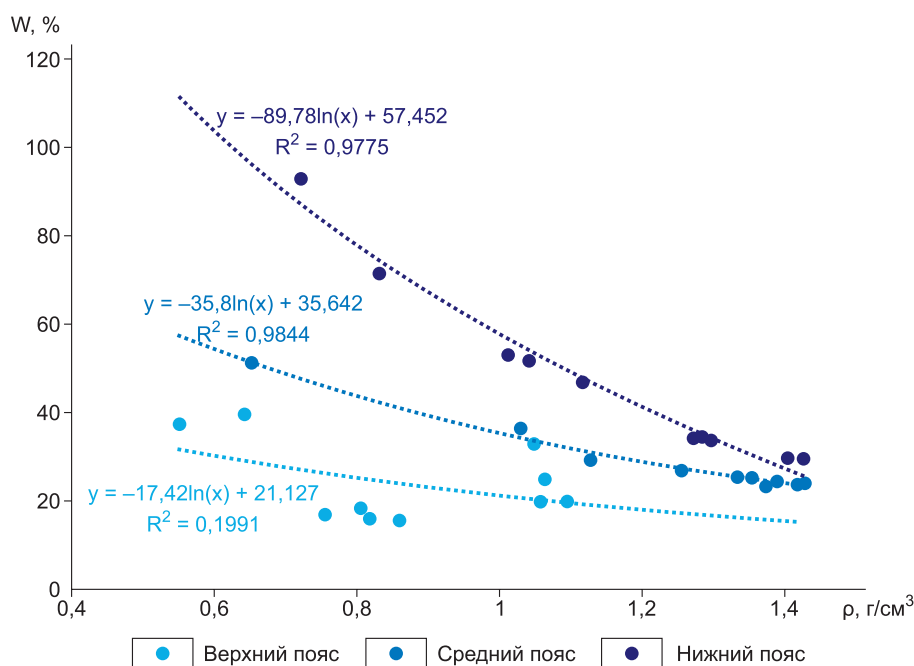


Рис. 3. Зависимость весовой влажности W от плотности сложения почвы ρ для трех гидрологических поясов аласа по данным 23 июня 2012 г.

Fig. 3. Relationship between gravimetric soil moisture W and bulk density (ρ) of soil for three hydrological belts of the alas based on data from June 23, 2012

Угловой коэффициент k является показателем чувствительности влажности к изменению плотности и связан со степенью водонасыщенности порового пространства. Константа C определяет общий уровень влажности в модели. В совокупности k и C количественно характеризуют общую увлажненность почвенного профиля. Высокие значения обоих параметров ($k > 80$, $C \approx 55-60$) соответствуют максимальной увлажненности (нижний пояс). Умеренные значения ($k \approx 35-60$, $C \approx 30-40$) указывают на оптимальное увлажнение (средний пояс). Низкие значения ($k < 35$, $C \approx 20-27$) свидетельствуют о выраженном дефиците влаги (верхний пояс).

Коэффициент детерминации R^2 , в свою очередь, является прямым индикатором степени однородности увлажнения профиля по глубине. Высокие значения R^2 (стремящиеся к 1) наблюдаются тогда, когда все горизонты почвы, независимо от глубины и плотности, увлажнены равномерно относительно их влагоудерживающей

способности. Такая ситуация возникает при доминировании латерального капиллярного подтока, который обеспечивает одновременное и равномерное насыщение всей толщи почвы, нивелируя вертикальные градиенты. В этом случае влажность каждого горизонта предсказуемо и однозначно определяется его плотностью.

Напротив, низкие значения R^2 указывают на неоднородное увлажнение профиля и формирование выраженного вертикального градиента влажности. Это характерно для режимов с вертикальным влагопереносом – при инфильтрации осадков сверху или при интенсивном испарении с поверхности. В таких условиях влажность горизонта зависит не только от его плотности, но и от его положения в профиле, что нарушает единый тренд и приводит к разбросу точек и падению R^2 .

Таким образом, комбинация параметров k , C и R^2 формирует диагностическую матрицу гидрологического режима и позволяет рассматри-

Таблица 2

Параметры логарифмических регрессионных моделей зависимости весовой влажности (W , %) от плотности сложения (ρ , г/см³) для трех гидрологических поясов аласа

Table 2

Parameters of logarithmic regression models for the relationship between gravimetric moisture (W , %) and bulk density (ρ , g/cm³) for the three hydrological belts of the alas

Дата	Пояс	Уравнение тренда	Достоверность аппроксимации R^2
23 июня 2012	Верхний	$W = -17,42\ln(\rho) + 21,127$	0,1991
23 июня 2012	Средний	$W = -35,8\ln(\rho) + 35,642$	0,9844
23 июня 2012	Нижний	$W = -89,78\ln(\rho) + 57,452$	0,9775
16–17 июля 2012	Верхний	$W = -18,73\ln(\rho) + 23,847$	0,3985
16–17 июля 2012	Средний	$W = -43,5\ln(\rho) + 38,378$	0,9856
16–17 июля 2012	Нижний	$W = -86,51\ln(\rho) + 59,951$	0,9831
20 сентября 2012	Верхний	$W = -28,69\ln(\rho) + 21,312$	0,968
20 сентября 2012	Средний	$W = -32,33\ln(\rho) + 29,86$	0,8916
20 сентября 2012	Нижний	$W = -73,39\ln(\rho) + 50,936$	0,9762
18 июня 2013	Верхний	$W = -25,63\ln(\rho) + 27,205$	0,4893
18 июня 2013	Средний	$W = -54,98\ln(\rho) + 40,506$	0,9821
18 июня 2013	Нижний	$W = -61,25\ln(\rho) + 46,936$	0,9812
19 июля 2013	Верхний	$W = -36,34\ln(\rho) + 23,76$	0,8243
19 июля 2013	Средний	$W = -39,63\ln(\rho) + 38,16$	0,9763
19 июля 2013	Нижний	$W = -74,56\ln(\rho) + 52,455$	0,9943
26 сентября 2013	Верхний	$W = -49,66\ln(\rho) + 25,428$	0,8938
26 сентября 2013	Средний	$W = -58,41\ln(\rho) + 38,795$	0,9349
26 сентября 2013	Нижний	$W = -92,26\ln(\rho) + 55,486$	0,9611

вать логарифмическую модель не просто как эмпирическое уравнение регрессии, а как физико-статистическую модель, раскрывающую генезис почвенной влаги и характер влагопереноса в мерзлотных ландшафтах.

Движение влаги в почвах происходит в направлении уменьшения ее общего потенциала (Ψ), который является суммой матричного, осмотического и гравитационного потенциалов [13–16]. Разность потенциалов влажности между горизонтами или участками почвы служит движущей силой влагопереноса – как в вертикальном, так и в латеральном направлении. Поэтому прямое измерение Ψ в пространстве и времени позволяет не только количественно оценить влагообеспеченность, но и выявить направление и интенсивность влагопотоков. В июне–июле 2013 г. наши прямые измерения потенциала почвенной влаги предоставили прямое доказательство существования трех принципиально различных гидрологических режимов, соответствующих концентрическим поясам аласа.

В нижнем (приозерном) поясе на протяжении всего периода наблюдений сохранялся стабильный гидрологический режим, характерный для зоны капиллярного насыщения. Абсолютные значения потенциала влажности демонстрировали исключительную стабильность, варьируя в узком диапазоне от -5 до $-7,5$ кПа (рис. 4), что указывает на постоянную близость к полной влагоемкости. Фундаментальной особенностью гидрологического режима данного пояса высту-

пает высокая степень пространственной однородности увлажнения почвенного профиля. Разность потенциалов между различными горизонтами не превышала 1,5 кПа, а в период с 7 по 13 июля 2013 г. было зафиксировано практически полное выравнивание значений потенциала на всех глубинах (10, 40 и 70 см), что свидетельствует о достижении состояния, близкого к гидростатическому равновесию.

Динамика потенциала демонстрирует характерное распределение суточной изменчивости по глубине профиля. Незначительные суточные колебания наблюдались исключительно в поверхностном слое (10 см), тогда как на глубине 40 см их амплитуда становилась минимальной, а на отметке 70 см – полностью нивелировалась. Такое распределение подтверждает, что возможные потери влаги с поверхности эффективно компенсируются восходящим потоком, и это предотвращает развитие сколько-нибудь существенного градиента влажности в нижележащих горизонтах.

Особый интерес представляют моменты, зафиксированные 25 июня, 5 и 16 июля, когда на всех глубинах наблюдались резкие синхронные сдвиги потенциала в область менее отрицательных значений. Примечательно, что реакция на глубинах 10 и 40 см характеризовалась не только временной синхронностью, но и сопоставимыми темпами роста. Данный факт противоречит классической модели инфильтрационного перераспределения атмосферных осадков, для которой

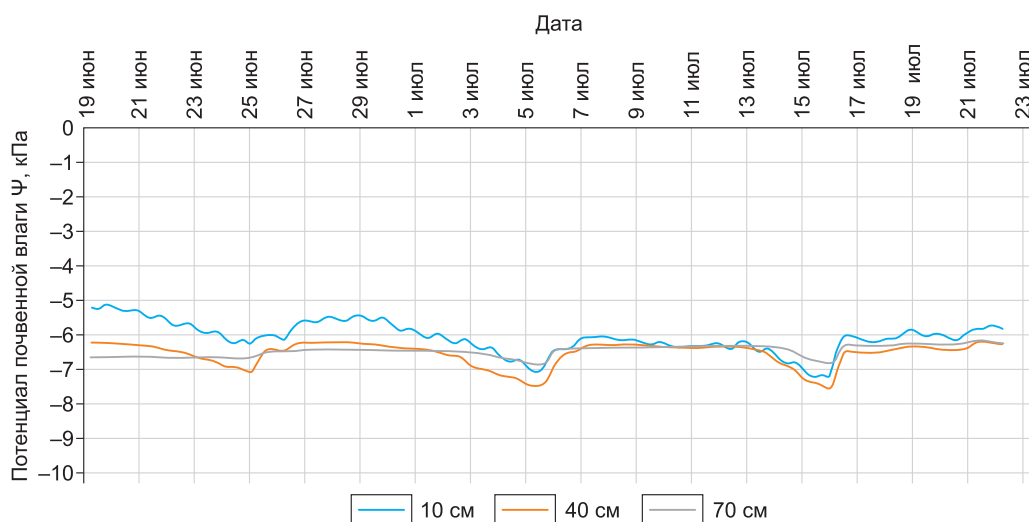


Рис. 4. Динамика потенциала почвенной влаги в нижнем поясе аласа в июне–июле 2013 г.

Fig. 4. Dynamics of soil water potential in the lower belt of the alas during June–July 2013

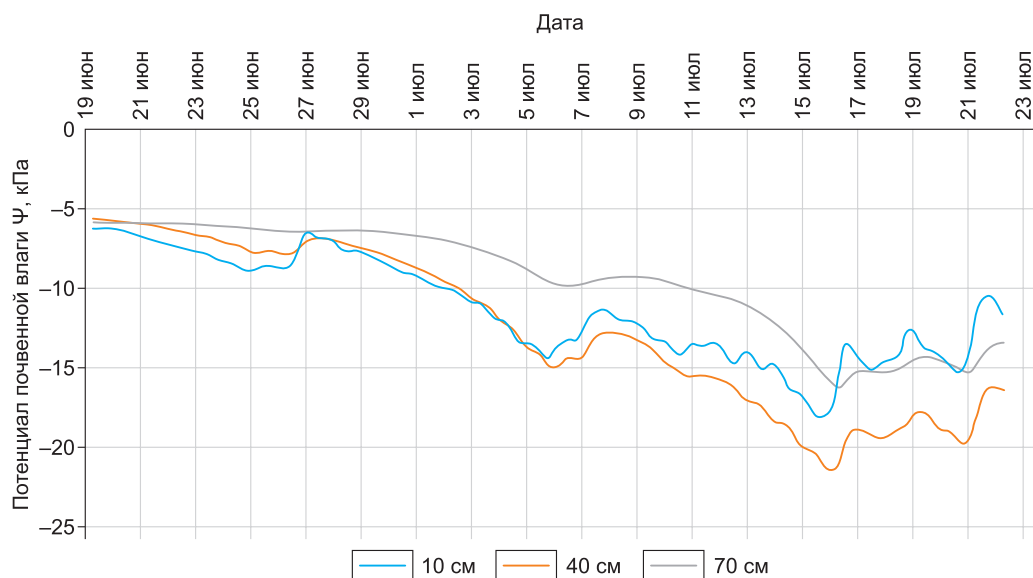


Рис. 5. Динамика потенциала почвенной влаги в среднем поясе аласа в июне–июле 2013 г.

Fig. 5. Dynamics of soil water potential in the middle belt of the alas during June–July 2013

характерно запаздывание и затухание сигнала с глубиной.

Совокупность наблюдаемых закономерностей – исключительная пространственно-временная однородность увлажнения, быстрое нивелирование суточных колебаний с глубиной и синхронная реакция всего профиля на события увлажнения – служит прямым свидетельством доминирующей роли интенсивного латерального капиллярного подтока от аласного озера. Именно этот стабильный боковой влагопоток обеспечивает эффективное поддержание потенциала в узком диапазоне, характерном для насыщенной зоны, компенсирует локальные флуктуации и формирует уникальный гидрологический режим постоянного капиллярного насыщения нижнего пояса аласа.

Гидрологический режим среднего пояса занимает переходное положение между зоной насыщения и зоной аэрации, что находит прямое отражение в сложной динамике потенциала почвенной влаги. В отличие от стабильного нижнего пояса, здесь четко прослеживается выраженный тренд на прогрессирующее иссушение в течение всего периода наблюдений (июнь–июль), особенно заметный на глубине 40 см (рис. 5). Эта общая тенденция формируется под совокупным воздействием трех основных факторов: ослабевающего латерального капиллярного подтока со стороны озера, суточного хода эвапотранспирации с максимумом в дневные часы

и эпизодической инфильтрации атмосферных осадков.

В результате взаимодействия этих разнонаправленных процессов складывается сложная картина динамики, где кратковременные скачки потенциала, связанные с событиями увлажнения, закономерно накладываются на долгосрочный фоновый тренд иссушения. При этом важно отметить, что по мере развития вегетационного сезона в почвенном профиле происходит постепенное перераспределение влажности. Если в начальный период наблюдений увлажнение было относительно равномерным по всему профилю, то в дальнейшем четко проявляется усиление вертикального градиента потенциала. Наиболее показательным является тот факт, что к середине лета именно на глубине 40 см регистрируются наиболее низкие значения потенциала (максимальное иссушение), в то время как на глубине 70 см сохраняются наиболее высокие и стабильные его значения, что указывает на буферную функцию этого глубокого слоя.

Особый интерес представляет характер реакции почвы на атмосферные осадки, которые в 2013 г. были особенно обильны. Анализ данных показывает, что осадки вызывают резкие, синфазные повышения потенциала во всем почвенном профиле, однако амплитуда этих изменений существенно зависит от глубины. Наиболее выраженная реакция наблюдается в поверхностном слое (глубина 10 см), тогда как на глубине

70 см ответная реакция минимальна. Такая дифференцированная реакция убедительно свидетельствует о том, что основная часть влаги от осадков задерживается и достаточно быстро расходуется именно в верхней части почвенной толщи, не достигая глубоких горизонтов в значительных объемах.

Таким образом, представленные данные однозначно свидетельствуют, что средний пояс функционирует как зона динамического баланса между латеральным притоком и вертикальными потерями влаги. Ослабевающий по мере удаления от озера латеральный подток уже не способен полностью компенсировать возросшие потери на эвапотранспирацию, что и обуславливает общий тренд на прогрессирующее иссушение в течение вегетационного сезона. На фоне этого иссушения в почвенном профиле формируется слабый вертикальный градиент влажности, величина которого носит сезонно-динамический характер. На начальных этапах наблюдений градиент между горизонтами был практически не выражен, однако к середине лета разность потенциалов между глубинами 10 и 70 см достигла 5–7 кПа. Это подтверждает, что латеральный подток, пусть и ослабевший, продолжает оказывать выравнивающее воздействие на распределение влаги, предотвращая резкую вертикальную дифференциацию влажности, характерную для чисто атмосферного режима увлажнения. Сохраняя чувствительность к атмосферным осадкам, этот пояс

демонстрирует сложное переплетение вертикальных и горизонтальных потоков влаги, что принципиально отличает его от однородно насыщенного нижнего пояса.

Гидрологический режим верхнего пояса демонстрирует признаки полного разрыва капиллярной связи с озером. В середине лета в поверхностном горизонте (10 см) был зафиксирован экстремум потенциала –981 кПа (рис. 6). Это значение близко к критическим порогам, описанным для травянистых растений в полусухих регионах, за которыми следуют резкое падение продуктивности [17, 18] и потеря растениями гидравлического контроля [19–26]. Это количественно подтверждает, что периферия аласа функционирует в режиме хронического гидравлического стресса, приводящего к формированию ксерофитной растительности.

Зафиксированный пик иссушения стал переломной точкой сезонной динамики. Ему предшествовал устойчивый нисходящий тренд, отражающий прогрессирующую потерю влаги в начале лета, тогда как после этой даты началось постепенное восстановление потенциала, связанное с совокупным действием осадков и ночной конденсации влаги.

Наблюдается резкая дифференциация гидрологического режима по глубине профиля. В поверхностном горизонте регистрируется выраженный суточный ход с амплитудой до 150 кПа, обусловленный термическим воздействием на

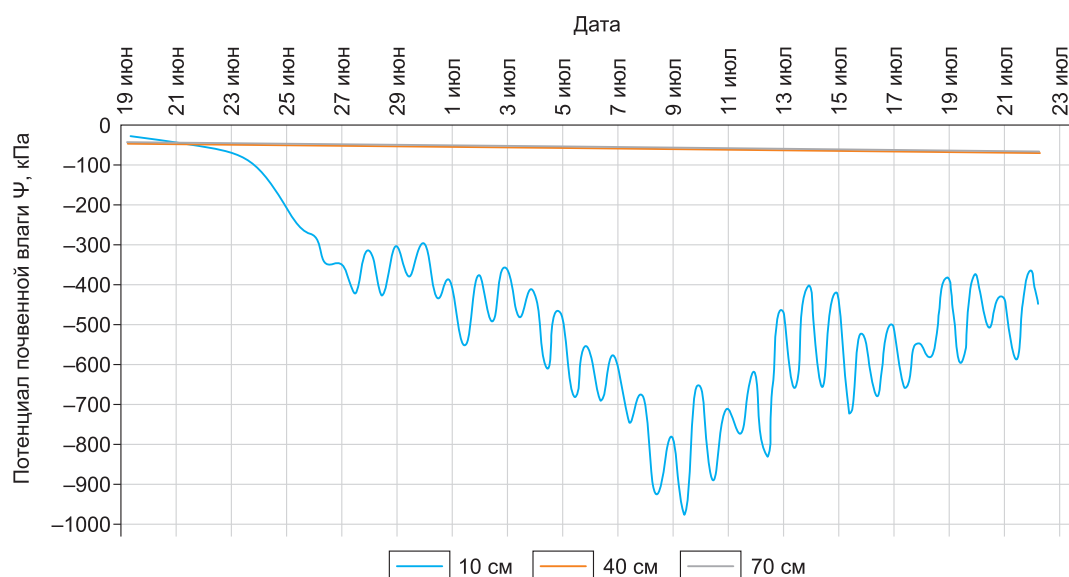


Рис. 6. Динамика потенциала почвенной влаги в верхнем поясе аласа в июне–июле 2013 г.

Fig. 6. Dynamics of soil water potential in the upper belt of the alas during June–July 2013

сорбционную влагу. В нижележащих слоях (40 и 70 см) суточные колебания полностью отсутствуют, что свидетельствует об их изоляции от поверхностных процессов. Характерной особенностью является полное отсутствие реакции горизонта 40–70 см на атмосферные осадки – инфильтрация влаги не проникает глубже 40 см, а вся поступающая влага расходуется в верхнем горизонте. Этот факт, установленный в условиях аномально влажного 2013 г., является ключевым доказательством того, что латеральный подток от озера полностью затухает, не достигая периферии аласной котловины, а влагообмен этого пояса абсолютно зависим от атмосферы.

Таким образом, верхний пояс функционирует как система с абсолютным преобладанием атмосферного типа увлажнения. Почвенный профиль представляет собой двухслойную структуру: динамичный поверхностный горизонт, подверженный термическому и испарительному воздействию, и глубоко залегающий стабильный горизонт, влажность которого определяется остаточными запасами влаги.

В целом результаты прямых измерений потенциала почвенной влаги предоставляют прямое и неоспоримое доказательство предложенной нами концепции радиально-концентрического гидрологического градиента.

Выявленный механизм латерального капиллярного подтока и формируемый им концентрический гидрологический градиент являются ключевым фактором организации всей аласной экосистемы. Этот градиент напрямую детерминирует пространственную дифференциацию всех компонентов ландшафта: от распределения растительных ассоциаций (гигрофитные → мезофильные → ксерофитные сообщества) и почвенного покрова (мерзлотные аласные болотные → луговые → остепненные почвы) до интенсивности биогеохимических процессов и биологической активности. Таким образом, алас представляет собой уникальную модель, где относительно простой гидрологический механизм, обусловленный сочетанием криогенного водоупора и латерального влагопереноса, создает сложно организованную концентрическую экосистему с четкой пространственной структурой, демонстрируя фундаментальную роль почвенно-гидрологических процессов в формировании ландшафтного и биологического разнообразия экосистем криолитозоны.

Заключение

Полученные результаты подтверждают, что гидрологическая структура аласных экосистем Центральной Якутии подчиняется радиально-концентрической, а не вертикальной модели дифференциации почвенной влаги. В отличие от классических схем, описанных А.А. Роде [1] и развитых для аридных и субаридных ландшафтов [2–5], где распределение влаги определяется капиллярной каймой над уровнем грунтовых вод, в аласах глубокие грунтовые воды отсутствуют, а сплошной мерзлотный экран исключает вертикальную инфильтрацию. Доминирующим процессом становится латеральный капиллярный подток от центрального озера, формирующий три концентрических пояса: зону постоянного капиллярного насыщения ($\Psi = -5 \dots -7,5$ кПа), зону динамического баланса латерального притока и эвапотранспирации ($\Psi = -6 \dots -20$ кПа) и зону атмосферного увлажнения с разрывом капиллярных связей (Ψ до -981 кПа).

Предложенный диагностический подход на основе параметров логарифмической зависимости $W = -k \cdot \ln(p) + C$ позволяет количественно разграничивать пояса по совокупности углового коэффициента k , константы C и коэффициента детерминации R^2 . Сопоставление данных двух сезонов с контрастным режимом осадков (37,6 и 180,8 мм за июнь–июль 2012 и 2013 гг. соответственно) показывает, что соотношение поясов сохраняется независимо от межгодовой изменчивости атмосферного увлажнения, и указывает на ведущую роль латерального подтока.

Таким образом, аласная экосистема представляет собой природную модель, в которой относительно простой физический механизм – латеральный капиллярный подток в условиях мерзлотного водоупора формирует концентрическую структуру, которой подчинено распределение почв, растительности и биологической активности. Предложенная модель формирует методическую основу для долгосрочного мониторинга гидрологического режима аласов и оценки их реакции на климатические и антропогенные воздействия.

Вместе с тем ряд вопросов остается открытым. Предстоит проверить воспроизводимость концентрической структуры на аласах иного размера, формы и степени обводненности, а также рассчитать параметры латерального влагопере-

носа с привлечением численного моделирования. В условиях деградации многолетней мерзлоты особенно важно оценить устойчивость выявленной структуры к изменению мощности деятельного слоя и площади аласных озер.

Список литературы / References

1. Роде А.А. *Избранные труды. Том IV. Проблемы гидрологии почв*. М.: ГНУ Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии; 2009. 598 с.
2. Rode A.A. *Selected Works. Volume IV. Problems of Soil Hydrology*. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Agricultural Sciences; 2009. 598 p. (In Russ.)
3. Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973;4:25–51. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>
4. Нестеренко Ю.М. Зона аэрации и водный режим в степях Южного Урала при глубоком залегании подземных вод. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2017;(2):3. – EDN: ZEUMBH
5. Nesterenko Yu.M. Aeration zone and water regime in the steppes of the South Ural in the deep of the ground of underground waters. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2017;(2):3. (In Russ.). – EDN: ZEUMBH
6. Кулик А.К., Балкушкин Р.Н. Типы водного режима песчаных массивов реки Дон. *Аридные экосистемы*. 2022;28(4):37–45. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2022-4-37-45>. – EDN: VVRFAS
7. Kulik A.K., Balkushkin R.N. Water regime types in sand massifs of the Don River basin. *Arid Ecosystems*. 2022; 12(4):374–381. <https://doi.org/10.1134/s2079096122040102>. – EDN: CRDMBA
8. Бадмаева С.Э. Солевой режим орошаемых черноземов юга Средней Сибири. *Природообустройство*. 2008;(5): 31–33. – EDN: JWMSSF
9. Badmaeva S.E. The salt regime of irrigated chernozem lands of the south of the Middle Siberia. *Prirodoobustroystvo*. 2008;(5):31–33. (In Russ.). – EDN: JWMSSF
10. Соловьев П.А. Аласный термокарстовый рельеф Центральной Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1973. 47 с.
11. Solov'ev P.A. *Alas thermokarst relief of Central Yakutia*. Yakutsk: Institute of Permafrost Studies, SB AS USSR; 1973. 47 p. (In Russ.)
12. Гаврилова М.К. *Климат Центральной Якутии*. Якутск: Якутское книжное издательство; 1973. 119 с. – EDN: VSLBIF
13. Gavrilova M.K. *The Climate of Central Yakutia*. Yakutsk: Yakutsk Book Publishing House; 1973. 119 p. (In Russ.). – EDN: VSLBIF
14. Сальва А.М., Матвеева И.П. Природные и мерзлотные условия Чурапчинского улуса Республики Саха (Якутия). *Вектор ГеоНаук*. 2019;2(4):70–75. <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10048>. – EDN: ZBKAPH
15. Salva A.M., Matveeva I.P. Natural and permafrost conditions Churapchinsky Ulus of the Republic of Sakha (Yakutia). *Vector of Geosciences*. 2019;2(4):70–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10048>. – EDN: ZBKAPH
16. Сальва А.М. Активизация термоэрозии и термокарста в зоне влияния самотечного канала (Центральная Якутия). *Отечественная геология*. 2014;(2):87–94. – EDN: SFOBID
17. Salva A.M. Activation thermoerosion and thermokarst at zone of influence drift channel (The Central Yakutia). *Otechestvennaya Geologiya*=[Domestic Geology]. 2014;(2):87–94. (In Russ.). – EDN: SFOBID
18. Сальва А.М. Инженерно-геологические особенности грунтов участка трассы магистрального водовода в Центральной Якутии. *Арктика и Антарктика*. 2020;(1):119–131. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.1.32055>. – EDN: STEBRM
19. Salva A.M. Engineering and geological features of the soil section of the main water pipeline route in Central Yakutia. *Arctic and Antarctica*. 2020;(1):119–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.1.32055>. – EDN: STEBRM
20. Десяткин Р.В., Десяткин А.Р. Термический режим мерзлотной лугово-черноземной солонцеватой почвы в многолетнем цикле. *Почвоведение*. 2017;(11):1344–1354. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17090027>. – EDN: ZIERWN
21. Desyatkin R.V., Desyatkin A.R. Temperature regime of solonchic meadow-chemozemic permafrost-affected soil in a long-term cycle. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(11):1301–1310. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032180X17090027>. – EDN: ZIERWN
22. Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов И.В. Криогенез и изменчивость параметров деятельного слоя естественных и агроландшафтов Центральной Якутии. *Вестник Якутского государственного университета*. 2005;2(3):36–49. – EDN: JXELCF
23. Gavriliev P.P., Ugarov I.S., Efremov I.V. Cryogenesis and variability of active layer parameters in natural and agricultural landscapes, Central Yakutia. *Vestnik Yakutskogo Gosudarstvennogo Universiteta (Vestnik of Yakutsk State University, now North-Eastern Federal University)*. 2005;2(3):36–49. (In Russ.). – EDN: JXELCF
24. Воронин А.Д. *Основы физики почв*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1986. 244 с.
25. Voronin A.D. *Fundamentals of Soil Physics*. Moscow: Moscow University Press; 1986. 244 p. (In Russ.)
26. Воронин А.Д. *Структурно-функциональная гидрофизика почв*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1984. 204 с.
27. Voronin A.D. *Structural-functional hydrophysics of soils*. Moscow: Moscow University Press; 1984. 204 p. (In Russ.)
28. Судницын И.И. *Движение почвенной влаги и водопотребление растений*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1979. 254 с. – EDN: TSHOTR
29. Sudnitsyn I.I. *Movement of soil moisture and water consumption by plants*. Moscow: Moscow University Press; 1979. 254 p. (In Russ.). – EDN: TSHOTR
30. Муромцев Н.А., Семенов Н.А., Шуравилин А.В. и др. Особенности внутрипочвенного влаго- и солепереноса. *Мелиорация и водное хозяйство*. 2008;(6):22–24. – EDN: JXGCRH
31. Muromtsev N.A., Semenov N.A., Shuravilin A.V., et al. Features of water and salt transport transfer. *Melioration and Water Management*. 2008;(6):22–24. (In Russ.). – EDN: JXGCRH
32. Fu Z., Ciais P., Feldman A.F., et al. Critical soil moisture thresholds of plant water stress in terrestrial ecosystems. *Science Advances*. 2022;8(44):eabq7827. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq7827>. – EDN: SHISDX
33. Fu Z., Ciais P., Wigneron J.P., et al. Global critical soil moisture thresholds of plant water stress. *Nature Communications*. 2024;15(1):4826. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49244-7>. – EDN: MMUFTO

19. Berauer B.J., Steppuhn A., Schweiger A.H. The multi-dimensionality of plant drought stress: The relative importance of edaphic and atmospheric drought. *Plant, Cell & Environment*. 2024;47(9):3528–3540. <https://doi.org/10.1111/pce.15012>. – EDN: IYTSZH
20. Cardoso A.A., Andrade M.T., Bucior E.R., Martins S.C.V. Plant hydraulic traits influencing crop production in water-limited environments. *Plant Physiology*. 2025;199(3):kiaf521. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiaf521>. – EDN: JWVZC
21. Hao F., Hu Y., Song Z., et al. Drought intensity shifts the roles of dominant species traits and species diversity on productivity resistance in arid grasslands. *BMC Plant Biology*. 2026;26(1):802. <https://doi.org/10.1186/s12870-026-08634-3>. – EDN: YTDGFI
22. Li X., Zuo X., Qiao J., et al. Context-dependent impact of changes in precipitation on the stability of grassland biomass. *Functional Ecology*. 2024;38(5):1185–1198. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14539>. – EDN: TZPNUQ
23. McDowell N., Pockman W.T., Allen C.D., et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*. 2008;178(4):719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
24. Schwinning S., Ehleringer J.R. Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems. *Journal of Ecology*. 2001;89(3):464–480. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2001.00576.x>
25. Time A., Acevedo E. Effects of water deficits on prosopis tamarugo growth, water status and stomata functioning. *Plants*. 2020;10(1):53. <https://doi.org/10.3390/plants10010053>. – EDN: IGGNKP
26. Zhang L., Ren X., Guo Y., et al. Plant functional trait is a strong predictor of ecosystem productivity under altered precipitation in desert steppes. *Ecohydrology*. 2024;17(7):e2686. <https://doi.org/10.1002/eco.2686>. – EDN: RTXTII

Об авторах

МАКАРОВ Виктор Семенович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории промышленной ботаники и экологического картографирования, НИИ экологии Севера Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова; старший научный сотрудник лаборатории криогенных ландшафтов, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, <https://orcid.org/0000-0002-4781-9027>, SPIN: 6635-3508, e-mail: mvs379@yandex.ru

САВВИНОВ Григорий Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник – директор, НИИ экологии Севера Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

Вклад авторов

Макаров В.С. – разработка концепции, методология, проведение статистического анализа, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Саввинов Г.Н.** – разработка концепции, руководство исследованием, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

MAKAROV, Victor Semyonovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Industrial Botany and Environmental Mapping, Research Institute of Applied Ecology of the North of the Ammosov North-Eastern Federal University; Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-4781-9027>, SPIN: 6635-3508, e-mail: mvs379@yandex.ru

SAVVINOV, Grigory Nikolayevich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher – Director, Research Institute of Applied Ecology of the North of the Ammosov North-Eastern Federal University, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

Authors' contribution

Makarov V.S. – conceptualization, methodology, formal analysis, investigation, writing – original draft; **Savvinov G.N.** – conceptualization, supervision, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 11.02.2026

Поступила после рецензирования / Revised 29.05.2026

Принята к публикации / Accepted 16.06.2026