

УДК 631.432

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕИСТОЩИТЕЛЬНОЙ ДЕСУКЦИИ ЛЕСОНАСАЖДЕНИЙ НА ИНТРАЗОНАЛЬНЫХ ЛУГОВО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ

© 2025 г. М. К. Сапанов*, М. Л. Сиземская

*Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, Московская область, Одинцовский район,
с. Успенское, 143030 Россия*

**E-mail: sapanovm@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.05.2024 г.

После доработки 21.09.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

В агролесомелиоративных системах, созданных в глинистой полупустыне междуречья Волги и Урала, изучены динамика уровня, минерализация и уклоны грунтовых вод под разными типами почв, занятых целинной и лесной растительностью, для обоснования возможности создания устойчивых древостоев. Обобщены результаты по особенностям влагооборота на засоленных светло-каштановых почвах и солончаковых солонцах, а также на опресненных лугово-каштановых почвах. Показан вертикальный разнонаправленный влагообмен с подстилающим песчаным горизонтом по локальным мезопонижениям рельефа (большие падины с лугово-каштановыми почвами): нисходящий — при инфильтрации талых вод и восходящий — при десукции массивных лесонасаждений. Выявлена возможность создания в падинах гидрологически нейтральных устойчивых небольших куртин и узких лесополос, десукция которых обеспечивается инфильтрационной талой водой, исторически безвозвратно теряемой на внутригрунтовый отток по подстилающему песчаному горизонту.

Ключевые слова: засушливый регион, мезопонижения рельефа, пресная линза, лесонасаждения, влагообмен, подстилающий песчаный горизонт.

DOI: 10.31857/S0024114825010068 EDN: EDOSKE

Изучению особенностей динамических явлений в потоках воды в засушливых регионах, их моделированию и прогнозированию под воздействием изменения климата и сельскохозяйственной нагрузки, в том числе агролесомелиорации, уделяется большое внимание (Соколова и др., 2001; Sophocleous, 2002; Kollet, Maxwell, 2006; Fleckenstein et al., 2010; Zhou, Li, 2011; Bradford et al., 2014; Колесников, 2019; Gleeson et al., 2020; Шеин и др., 2021; Quichimbo et al., 2021).

В этой связи необходимо отметить, что на исконно безлесных аридных территориях, например на Прикаспийской низменности, выращивание долговечных лесных насаждений чрезвычайно затруднено вследствие перманентного дефицита воды, поскольку деревьям и кустарникам необходимо гораздо больше влаги, чем исконно произрастающим здесь травянистым растениям, которые могут заканчивать сезонное развитие при почвенной засухе уже в середине вегетационного сезона,

тогда как древесная растительность должна функционировать до осени. Поэтому сомкнутые древостои могут расти здесь только при доступных грунтовых водах, так как весенней влагозарядки почвы совершенно недостаточно для их полноценной жизнедеятельности (Роде, Польский 1963; Оловяникова, 1966, 1976; Сапанов и др., 2010).

Механизмы движения воды и солей в почвогрунтах Прикаспия достаточно подробно изучали в агролесомелиоративных системах Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН, который территориально расположен в полупустыне междуречья Волги и Урала (49.3980°N, 46.7960°E). За 70-летний период исследований опубликованы основополагающие работы, в которых, например, представлены: влагонакопление почв солонцового комплекса за счет перераспределения атмосферных осадков по территории в процессе снегопереноса и поверхностного стока талых вод; водно-физические почвенные константы и их интервалы;

типы водного режима почв и диапазоны активной влаги на целине и в агролесомелиоративных системах; эвапотранспирация экосистем, в том числе из грунтовых вод (Мозесон, 1955; Распопов, 1956; Роде, Польский, 1961, 1963; Киссис, Польский, 1963; Большаков, 1964; Базыкина, 1974; Сиземская, 2013).

Было показано, что наилучшими лесорастительными условиями обладают локальные микро- и мезопонижения рельефа (западины, большие падины) с лугово-каштановыми почвами и пресными линзами на глубине 5.5–7.0 м. Однако даже здесь при создании многорядных сомкнутых лесных культур всегда отмечается постепенное засоление этих линз и гибель древостоев (Оловянная, 2000; Сапанов, 2005).

В этой связи интересны вопросы выявления механизма вторичного засоления пресных линз в лугово-каштановых почвах и возможности их сохранности созданием особых типов лесонасаждений. Например, длительное время предполагали, что на больших падинах увеличение минерализации под массивными насаждениями происходит боковым подтоком засоленных грунтовых вод из-под прилегающих светло-каштановых почв. Для исключения такого процесса и его замещения предлагали создавать древостой не только на некотором расстоянии от края падины, но и с оставлением 1/3...1/5 части падин под целинной растительностью или даже “вечным паром” (Ковда, 1950; Распопов, 1956; Роде, Польский, 1963; Карандина, Эрперт, 1972; Сенкевич, Оловянная, 1996).

Однако пресная линза под многорядными насаждениями все равно начинала засоляться после ~ 25-летнего периода их выращивания. Лишь в начале 1980-х гг. Г.П. Максимюк предположила, что под высокотранспирирующими древостоями вторичное засоление происходит за счет вертикального

подъема засоленных вод из нижележащего горизонта. Этот процесс в дальнейшем подтвердили другие ученые (Оловянная, Линдеман, 2000; Сапанов, 2003, 2005). Поэтому оказалось необходимым прояснить наличие межпластового водопора между тяжелым суглинком и подстилающим песчаным горизонтом, а при его отсутствии выявить особенности вовлечения во влагооборот нижележащего слоя.

Цель данной работы — показать общий сценарий круговорота воды в лесоаграрном ландшафте с учетом комплексности почвенного покрова и разнообразия растительных экосистем, с определением механизмов движения водных потоков под всеми типами почв, в том числе в замкнутых понижениях рельефа, для выявления возможности создания в них экологически безопасных древостоев с неистощительным гидрологическим режимом использования пресных линз.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили на объектах Джаныбекского стационара. Изучаемая территория, бывшее дно Каспийского моря, в гидрологическом отношении является закрытой системой и представляет собой тектоническую впадину, верхняя часть которой сложена песчано-глинистыми осадками четвертичных трансгрессий Каспия (табл. 1). Территория имеет незначительный уклон (0.1‰) в сторону моря. Рельеф равнинно-волнистый, с плоскими депрессиями — падинами и лиманами (Ковда, 1950; Роде, Польский, 1961).

Основной почвенный покров представлен трехчленным солонцовым комплексом, формирование которого обязано микрорельефу с перепадом высот в несколько десятков сантиметров: на возвышенных участках развиты солончаковые солонцы

Таблица 1. Гранулометрический состав и засоление грунтов под светло-каштановыми почвами, примыкающими к большой падине*

Глубина, м	Мощность, м	Сумма солей, г/ 100 г сухой почвы	Примечание
0–15	15	0.998	Тяжелый суглинок, с 10 м легкий, вязкий
15–19	4	0.074	Песок кварцевый, тонкозернистый, глинистый
19–21	2	0.087	Глина легкая, песчаная, уплотненная
21–37	16	0.082	Песок мелкозернистый, кварцевый
37–40	3	0.204	Глина плотная, слабослюдистая
40–45	5	0.046	Песок мелкозернистый, кварцевый
45–80	35	0.284	Глина с присыпками песка, плотная
80–92	12	0.184	Песок глинистый
92–100	8	0.335	Глина плотная

Примечание. *Данные были предоставлены Г.П. Максимюк (цит. по Сапанов, 2003, с. 24).

с пустынными травяными сообществами, на склонах — светло-каштановые солонцеватые почвы с полупустынными сообществами, в замкнутых микропонижениях (так называемые “западины”) — черноземовидные темноцветные (лугово-каштановые) почвы с разнотравно-злаковыми степными сообществами. При этом типы почв сменяют друг друга через каждые несколько метров. На территории также присутствуют блюдцеобразные мезопонижения (большие падьины) глубиной до 2 м и площадью от 1 до 100 га, которые занимают около 10–12% всей ее площади. В падинах также развиты и лугово-каштановые почвы со степной растительностью. На некоторых участках в общем почвенном покрове мезо- и микропонижения в сумме могут занимать до 30% площади (Каменецкая, 1952; Роде, Польский, 1961, 1963; Конюшкова, Козлов, 2010).

Грунтовые воды имеют общий уровень и находятся в состоянии динамического равновесия на глубине 5.5–7.0 м. Под целинными солонцами они засолены до 10 г/л, под светло-каштановыми почвами — до 5–6 г/л, их состав хлоридно-сульфатно-натриевый. Под лугово-каштановыми почвам и присутствует опресненная линза гидрокарбонатно-кальциевого состава и минерализацией менее 1.0 г/л, которая как бы вдавлена в засоленные воды. Постоянное разное засоление грунтовых вод под разными типами почв, отсутствие гидрографической сети и общего уклона на равнинной территории указывают на ее бессточность (Роде, Польский, 1963).

Режим и минерализацию грунтовых вод в пресной линзе изучали на целинной падьине, в дендрарии Джаныбекского стационара, в небольших взрослых многорядных лесных массивах, в узких 2–3-рядных лесополосах, а также в отдельных куртинах. Рассматриваемые лесонасаждения представлены дубом черешчатым (*Quercus robur* L.), вязом приземистым (*Ulmus pumila* L.), ясенем пенсильванским (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.), разными видами тополей (*Populus*) и другими древесно-кустарниковыми видами.

В нескольких постоянных наблюдательных скважинах под разными элементами ландшафта уровень грунтовых вод (УГВ) замеряли в течение многих лет ежедекадно хлопущками с точностью ± 1 см. Также были заложены временные наблюдательные скважины в лесных культурах разного породного состава. Все скважины нивелировали относительно друг друга. Общее ежегодное значение УГВ определяли в скважинах, расположенных на солончаковом солонце, и рассчитывали как среднеарифметическое значение ежемесячных показателей. Изменение минерализации грунтовых вод определяли по химическому анализу осенних проб (Воробьева, 1998). Использовали архивные данные Саратовской гидрогеологической экспедиции

Нижеволжского геологического управления Министерства геологии РСФСР.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованиями Джаныбекского стационара выявлены основные особенности круговорота воды в целинных ландшафтах Прикаспийской низменности, приходной частью водного баланса которых являются лишь атмосферные осадки. За 70-летний период среднее количество осадков составляет 291 мм. На холодный период года приходится 135 мм (с амплитудой 150–498 мм), при месячной норме 18–25 мм. Основная часть этой влаги перераспределяется по площади и депонируется в почвогрунте. На теплый период приходится 156 мм (с амплитудой 44–354 мм), при месячной норме 22–33 мм. Эта влага сразу же участвует в эвапотранспирации наземных экосистем. Испаряемость в теплое время года (апрель — сентябрь) многократно превышает количество осадков, достигая в июле максимума — 1018 мм (Сапанов, 2021).

Осенне-зимние осадки в результате неравномерного распределения снега и периодического поверхностного стока талых вод по элементам микро- и мезорельефа формируют разные весенние влагозапасы на разных типах почв и частично пополняют грунтовые воды. В целинных солончаковых солонцах весенние влагозапасы почти в половину меньше выпадающих осадков за холодный период года (~ 80 мм), в светло-каштановых почвах соответствуют им (~ 144 мм), а в лугово-каштановых превышают более чем в два раза (~ 332 мм). Ежегодно эта влага на всех типах почв расходуется на эвапотранспирацию растительных сообществ. Кроме этого, средний расход из грунтовых вод на всех типах почв принято считать около 30 мм/год, главным образом, за счет физического испарения (выпот) с поверхности капиллярной каймы, лишь на лугово-каштановых почвах он несколько больше вследствие десукции некоторых видов глубоко укореняющихся трав (Роде, Польский, 1963; Оловяннаякова, 1966).

Приход воды в грунтовые воды осуществляется по западинам и падьинам (по мнению Г.Н. Высоцкого (1960), “потускулярный тип” водного режима наблюдается, когда при сквозном промачивании инфильтрационные воды смыкаются с пресной линзой с образованием временного водяного купола, который, затем осаживаясь, пополняет эти линзы и участвует в общем гидростатическом подъеме уровня грунтовых вод (Распопов, 1956; Роде, Польский, 1963)).

Общие динамические явления в грунтовых водах происходят вследствие инфильтрации талых вод и сезонной эвапотранспирации растительных экосистем. В иные годы ранневесеннего полного

промачивания почвогрунта с пополнением пресных линз может не наблюдаться. Результирующей величиной водного баланса территории является среднегодовой УГВ, который регулируется соотношением приходной и расходной его частей. В целом годовой подъем УГВ на территории происходит в увлажненные годы, опускание — в засушливые годы. Наиболее показателен быстрый подъем УГВ более чем на 2 м в 1980–1994 гг., который, кстати, совпал с подъемом уровня воды в Каспийском море и небольшом озере Челкар. С середины XX века самое низкое залегание УГВ отмечено в 1976 г. (7.2 м), самое высокое — в 1995 г. (4.4 м). Состояние динамического равновесия УГВ целинных ландшафтов обусловлено в основном климатическими изменениями природной среды (Соколова и др., 2001; Сапанов, 2007, 2021).

Другое дело — трансформация почвенно-гидрологической обстановки под влиянием агролесомелиорации, когда водные и солевые потоки изменяются не только по скорости, но и по направлению. Например, за счет мелиорации и дополнительного снегонакопления в лесополосах солончаковые солонцы и светло-каштановые почвы становятся водопроницаемыми, что вызывает периодическое полное промачивание зоны аэрации и отмывание верхних горизонтов от легкорастворимых солей, вследствие чего нижняя часть профиля и грунтовые воды еще более засоляются и поэтому по-прежнему остаются недоступными для растений. При этом расходы на эвапотранспирацию из зоны аэрации увеличиваются на этих типах почв до 181 мм и 227 мм соответственно. Расходы из грунтовых вод на мелиорированных солонцах и светло-каштановых почвах остаются прежними (физическое испарение в парообразном виде), в то время как на лугово-каштановых почвах происходит существенное изменение механизмов расхода влаги из грунтовых вод вследствие увеличения десукции древесно-кустарниковой растительности (Базыкина, 1974; Оловянникова, 1996; Сиземская, 2013).

Формирование гидрологического режима почвогрунтов в западинах. Площадь западин колеблется в значительных пределах (от нескольких десятков до сотен квадратных метров). Количество депонированной в целинных западинах воды вследствие

поверхностного притока зависит от их емкости и площади водосбора, а также дополнительного снегонакопления. Отличительной особенностью этих понижений является небольшая глубина, поэтому при периодическом поверхностном притоке они могут максимально вмещать около 300–500 мм воды. Западины заполняются водой достаточно часто: при сильных ливнях, зимних оттепелях, весеннем снеготаянии. Инфильтрация этой воды в почвогрунт приводит к гашению всего дефицита влаги в зоне аэрации и периодическому образованию водяного купола (Роде, Польский, 1963).

Дальнейший механизм формирования водных потоков в куполе недостаточно изучен. Считается, что постепенное его исчезновение связано с физическим вдавливанием в пресную линзу, вследствие которого она и образуются. Однако встречаются работы, где указывается возможность их некоторого растекания под прилегающие светло-каштановые почвы. В любом случае инфильтрационные купола участвуют в весеннем подъеме общего зеркала воды во всем ландшафте без заметного изменения архитектуры солевого состояния всех типов почв. Именно это состояние указывает на процесс преимущественного вдавливания купола в грунтовые воды с последующей гидростатической коррекцией его уровня во всем целинном ландшафте.

Целинные пресные линзы в западинах часто бывают засоленными, по-видимому, вследствие превышения расходной части водного баланса над приходной (Роде, Польский, 1963; Сиземская, Бычков, 2005). О близком расположении засоленных вод в конкретной западине можно судить, например, по быстрому увеличению минерализации почти с поверхности зеркала воды при бурении скважины с постепенным отбором перемешанной воды (табл. 2). Данное обстоятельство указывает на их маломощность и отсутствие значимого влагообмена с подстилающим песчаным горизонтом.

Данное обстоятельство указывает на их маломощность и отсутствие значимого влагообмена с подстилающим песчаным горизонтом.

В западинах, используемых для посадки сомкнутых лесных культур, пресная линза исчезает еще быстрее и не восстанавливается из-за увеличения

Таблица 2. Изменение минерализации грунтовых вод под целинной западиной при увеличении глубины скважины (УГВ 5.2 м)

Глубина скважины, м	Сумма солей, г/л	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
		ммоль-экв/л						
5.5	1.677	0	5.6	7.6	11.8	9.5	3.8	11.7
6.8	2.510	0	4.2	14.0	21.0	16.5	9.5	13.2
7.4	3.060	0	4.6	16.4	26.5	16.5	11.0	20.0
8.0	4.102	0	4.4	19.4	39.0	17.5	11.0	34.3

десуктивного расхода из ее капиллярной каймы. Восстановлению линзы не помогают даже постоянно возникающие здесь инфильтрационные водяные купола за счет лучшего снегозадержания и поверхностного стока талых вод при оттепелях. Иными словами, в западинах вся поступающая в почвогрунт инфильтрационная вода всегда полностью тратится на эвапотранспирацию лесонасаждений, так как их корневые системы занимают весь объем зоны аэрации почвенного профиля до капиллярной каймы. Многие виды посаженных деревьев и кустарников в процессе роста и развития вполне приспособляются к динамике ежегодных почвенных влагозапасов и могут функционировать достаточно долго (Оловянникова, 1976; Сапанов, 2003; Колесников, 2019). Именно поэтому своеобразный колючно-западинный ландшафт на Джаныбекском стационаре сохраняется без агротехнических и лесоводственных уходов более 70 лет.

Формирование гидрологического режима почвогрунтов в падинах. Под целинными большими падинами гидрологический режим пресных линз значительно отличается от сценария движения водных потоков в западинах. Заполнение падин происходит лишь в результате периодического поверхностного весеннего притока талых вод с образованием кратковременно существующих озер (3–10 дней) глубиной 50–100 см. Такой поверхностный сток талых вод в падины происходит через каждые несколько лет за счет быстрого снеготаяния при установлении в течение нескольких дней постоянных суточных температур воздуха выше 0°C на фоне промерзшей почвы, которая препятствует впитыванию влаги *in situ*. Инфильтрация этой воды в почвогрунт приводит к образованию водяного купола. Было подсчитано, что при поступлении 1000 мм дополнительной инфильтрационной влаги водяной купол может выходить на поверхность почвы при изначальном уровне воды в пресной линзе около 7 м. В дальнейшем в результате эвапотранспирации растительных сообществ и гидростатического выравнивания общего зеркала грунтовой воды эти купола исчезают (Роде, Польский, 1963; Базыкина, Максимюк, 1978).

Интересен вопрос о мощности самой пресной линзы в падинах. По данным Саратовской гидрогеологической экспедиции, в целинной падине химический анализ отобранных образцов из пьезометрических скважин, фильтры которых расположены на глубине 9–12 м от поверхности почвы в тяжелом суглинке, выявляет наличие пресной линзы с общей минерализацией 0.2–0.4 г/л, тогда как вода из подстилающего песчаного межпластового горизонта с фильтрами на глубине 15.2–17.3 м показывает минерализацию 0.5–2.5 г/л. Кроме этого, выявлено резкое уменьшение засоленности грунтов в подстилающем песчаном горизонте под засоленными светло-каштановыми почвами

вблизи падины (см. табл. 1), что, по-видимому, указывает на рассоляющее воздействие подстилающего межпластового горизонта инфильтрационными водами при их горизонтальном оттоке.

Как видим, тезис о транзите инфильтрационной воды под целинными падинами в межпластовый горизонт легкого механического состава через давно существующую пресную линзу в тяжелом суглинке представляется вполне вероятным, но трудно доказуемым. При существовании этого механизма на бессточной равнинной местности такой горизонтальный отток по подстилающему горизонту, обладающему высокой влагопроводностью, будет вызывать гидростатический подъем и выравнивание общего зеркала грунтовых вод под всеми типами почв. Наличие такого процесса предполагает некоторое накопление пресной инфильтрационной воды в подстилающем песчаном горизонте, а результирующей величиной является общий подъем грунтовых вод во всем ландшафте.

Эвапотранспирационный расход травяных экосистем в летний период вызывает обратный водный поток с неравномерным опусканием УГВ под разными типами почв. При этом в целинных падинах опускание воды вызывает образование депрессионной воронки, днище которой располагается ниже общего УГВ, что указывает не только на выпот, но и на десукцию степных травянистых видов из капиллярной каймы пресной линзы (рис. 1). При этом замещающий подток в эту депрессию, очевидно, может происходить именно из нижележащего песчаного межпластового горизонта.

Представленный здесь сценарий впервые раскрывает особенности естественного круговорота воды на целинной равнинной бессточной территории с вовлечением подстилающего горизонта в гидростатическую коррекцию общего зеркала воды, однако он имеет ряд предположений, поэтому не может считаться достоверно доказанным, хотя и полностью объясняет пестроту и сохранность минерализации грунтовых вод под разными типами почв на фоне потускулярного водоснабжения и годовой ее динамики.

Достоверное доказательство водообмена между тяжелым суглинком и подстилающим песчаным горизонтом стало возможным с появлением искусственных лесных экосистем, которые начали выращивать здесь с середины XX в. Существующее разнообразие лесных культур по ассортименту, способам посадки и размещению на падинах позволяет выявить некоторые механизмы движения воды в насыщенных грунтах.

Особенности почвенно-гидрологической обстановки в облесенных больших падинах. Начиная с 1951 г. на Джаныбекском стационаре в падинах стали создавать разнообразные лесные насаждения.

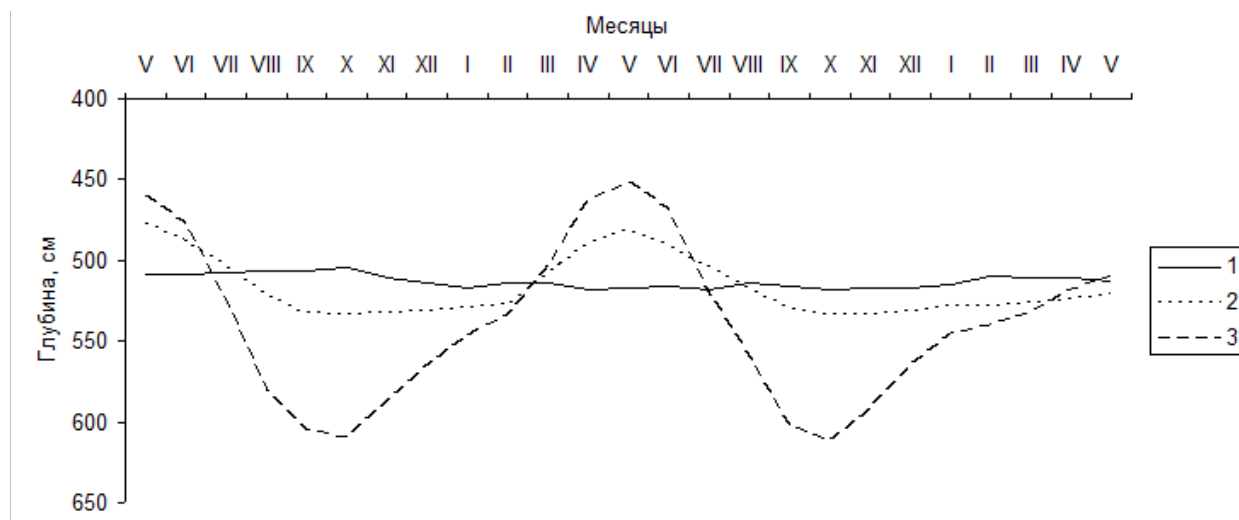


Рис. 1. Сезонная динамика уровня грунтовых вод за трехлетний период на солончаковом солонце с целинной пустынной растительностью (1) и на лугово-каштановой почве двух больших пастбищ с целинной степной и древесно-кустарниковой растительностью, (2) и (3) соответственно.

Наиболее интересны многорядные лесные массивы, в которых в период от 22 до 27 лет пресная линза начинает постепенно засоляться, особенно под древостоями из дуба черешчатого и вяза приземистого, которые имеют двухъярусную корневую систему: первый ярус у них расположен в верхнем почвенном горизонте весеннего влагонакопления, второй — в капиллярной кайме пресной линзы. Сильный десуктивный расход из капиллярной каймы вызывает образование под такими древостоями сезонной чашеобразной выположенной депрессионной воронки в пресной линзе глубиной до 2.5 м (Оловянникова, 1977, 1996; Сапанов, 2000).

Наиболее сложным оказалось вычисление десукции из грунтовых вод из-за постоянного замещающего подтока в эту депрессию, который трудно корректно определить. На стационаре скорость подтока учитывали двумя методами (с использованием разных коэффициентов удельной водоотдачи). По первому методу подток определяли по скорости осеннего подъема уровня воды после прекращения вегетации растений, по второму — кроме этого учитывали еще и скорость ночного восстановления уровня после дневной транспирации древостоя. Этими методами было подсчитано, что ежегодная десукция из пресной линзы у дуба и вяза составляет более 450 мм/год, а общий эвапотранспирационный расход приближается к испаряемости (Киссис, Польский, 1963; Оловянникова, 1977; Сапанов, 2003; Колесников, 2019). При такой десукции насаждений весь запас пресной линзы, который составляет около 3600 мм пресной воды в тяжелосушливистом горизонте, должен быть израсходован в течение 8 лет. В действительности же, очевидно, в силу разных причин: постепенного увеличения листовой массы в течение длительного

времени и периодического пополнения пресной линзы инфильтрационными водами — ее истощение начинается с 25-летнего возраста, что регистрируется по резкому увеличению ее минерализации, которая затем стабилизируется на уровне 6–7 г/л (рис. 2).

Это связано с тем, что именно при таком засолении начинается распад древостоев. Например, единичные экземпляры дуба в срединной части многорядного лесного массива начинают погибать вне зависимости от рангов развития деревьев после достижения минерализации грунтовых вод около 3 г/л. В дальнейшем, по мере увеличения вторичного сульфатно-хлоридно-кальциевого засоления линзы до 4.0–6.5 г/л, здесь отмечается полный распад дубового древостоя из-за дефицита воды, так как деревья перестают ее потреблять. Аналогичное вторичное засоление пресной линзы, сопровождающееся гибелью дуба, вяза и тополей, отмечается на других пастбищах (Оловянникова, Линдеман, 2000; Сапанов, 2005). Уровень засоления пресной линзы после распада посаженного древостоя со временем не уменьшается, вследствие сохранности высокой десукции спонтанно появляющимся подростом самосевных видов других деревьев и кустарников. Иными словами, при наличии древесно-кустарниковой растительности восстановление пресной линзы не происходит.

Именно этот процесс истощения пресной линзы в срединной части лесных массивов позволил предположить механизм замещения десуктивно израсходованной влаги восходящим подтоком из подстилающего песчаного горизонта (Сапанов, 2000, 2003). В частности, на это указывает как выположенное дно депрессионной воронки с уклоном всего 0.23 ± 0.1 градусов (табл. 3), так и

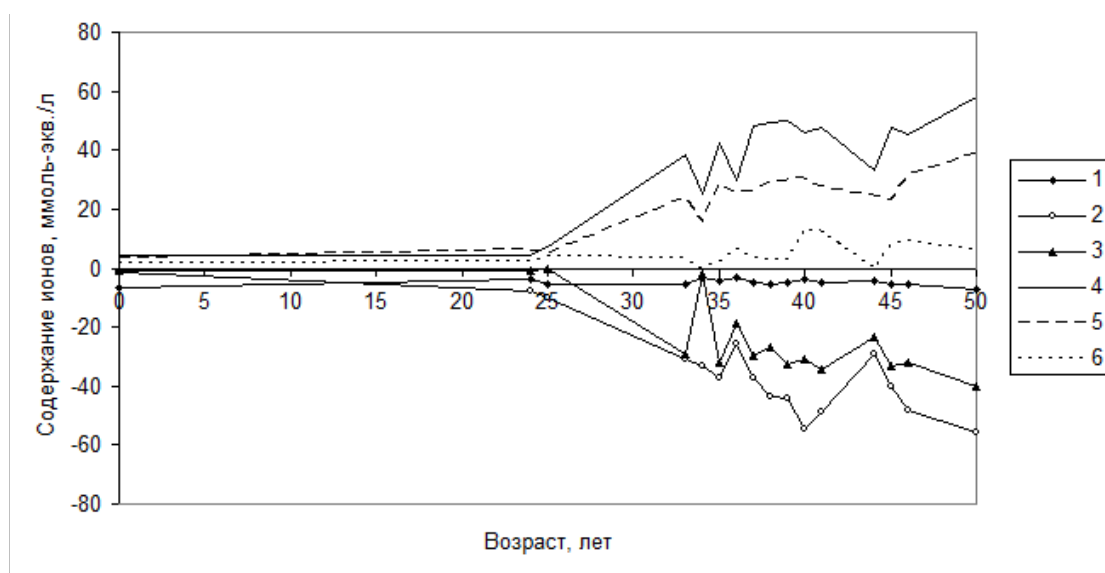


Рис. 2. Динамика вторичного засоления пресной линзы под культурами дуба в падине. Ионы: 1 — HCO_3^- ; 2 — Cl^- ; 3 — SO_4^{2-} ; 4 — Ca^{2+} ; 5 — Mg^{2+} ; 6 — Na^+ (цит. по Сапанов, 2003, с дополнением).

Таблица 3. Наибольшие уклоны в уровнях воды в пресной линзе внутри насаждения дуба черешчатого 35-летнего возраста и в опушечной зоне

Участок	Время года	Уклон УГВ, град	Стандартное отклонение
Внутри насаждения	Весна	0.23	0.1
	Лето	0.32	0.1
Опушка	Весна	3.43	2.5
	Лето	21.2	2.1

неизменная сохранность пресной воды в линзе под целинной падью вокруг лесного массива и даже под опушечными рядами деревьев (табл. 4).

Опушечная зона в линзе под насаждением шириной не более 8–10 м длительное время остается опресненной, по-видимому, за счет бокового подтока пресной воды из-под примыкающей части падьи по явно выраженному здесь уклону более чем 21° (табл. 3–4).

Поэтому деревья здесь продолжают оставаться здоровыми. Однако если древостой располагается близко к краю падьи, то опушечные деревья также погибают вследствие бокового подтока засоленной воды из-под примыкающей светло-каштановой почвы (Сапанов, 2003).

Совершенно не засоляется пресная линза при посадке узких лесополос на падью, даже при использовании высокотранспирирующих видов, например из вяза приземистого. В вязовом двухрядном 70-летнем насаждении концентрация солей не превышает 0.880 г/л. Как видим, в опушечных рядах массивных древостоев и в узких лесополосах десуктивный расход из капиллярной каймы пресной линзы, очевидно, гасится боковым подтоком

воды из-под примыкающей целинной части падьи. В свою очередь на целине пресная линза периодически пополняется инфильтрационной талой водой, которая обычно безвозвратно теряется в виде оттока по подстилающему песчаному горизонту. Именно перехват этой пресной воды позволяет обосновать создание экологически нейтральных древостоев по отношению к пресным линзам. Получение такого практического результата возможно только созданием узких лесных полос или небольших куртин с равномерным размещением их вдали от края падьи. Существующие на падьях вблизи стационара единичные 100-летние здоровые экземпляры дуба черешчатого и куртины вяза гладкого (*Ulmus laevis* Pall.) подтверждают данный тезис.

Изученность и длительный мониторинг водно-солевого режима всех типов почв равнинной Прикаспийской территории в целинном и облесенном состоянии ранее позволили нам предложить аналогичные варианты создания лесонасаждений (Сапанов, 2003), однако проведенный здесь анализ выявил весь сценарий движения воды в ландшафте, в том числе потускулярный вертикальный

Таблица 4. Осенняя минерализация и состав грунтовых вод по профилю: целинный солончаковый солонец — целинная светло-каштановая почва — целинная лугово-каштановая почва большой падины — лесной массив шириной 100 м из 35-летних культур дуба черешчатого — 36-летние культуры боярышника мягковатого (*Crataegus submollis* Sarg.)

№	Сумма солей, г/л	ммоль-экв/л						
		CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Солончаковый солонец (50 м от падины)								
1	9.09	0	6.8	76	62	29.6	21.7	93.5
Светло-каштановая почва (на склоне падины)								
2	6.07	0	4.7	2.2	81.5	20.5	16.5	51.4
Целинная восточная часть падины (16 м от опушки культур)								
3	0.84	0	6.2	4.6	1.4	4.7	3.7	3.8
Целинная восточная часть падины (5 м от опушки)								
4	0.90	0	6.6	2.3	3.9	6.3	4.2	2.3
Опущенный восточный 1 ряд древостоя								
5	0.91	0	7.2	3.8	1.9	6.3	2.6	4
Опущенная зона древостоя (2 м от 1 ряда)								
6	1.01	0	5	9.7	1.4	8.9	5.3	1,9
Опущенная зона древостоя (4 м от 1 ряда)								
7	1.13	0	4.2	14.3	1.4	11.1	3.6	1.3
Опущенная зона древостоя (8 м от 1 ряда)								
8	1.30	0	4.2	18.1	0.5	13.2	9.4	0.2
Срединная часть древостоя (50 м от восточной пушки)								
9	4.89	0	5	41.4	34.5	52.2	27.8	3.4
Срединная часть древостоя (25 м от западной опушки)								
10	4.94	0.6	4.8	32.4	42.8	40.4	25.3	14.3
Опущенный западный 1 ряд древостоя								
11	1.23	0	5.6	12.8	1.9	11.1	8.4	0.8
Культуры боярышника								
12	1.42	1.4	5.5	16.4	1.3	7.7	6.5	9

водообмен с подстилающим песчаным горизонтом по замкнутым локальным понижениям рельефа (большие падины). Это существенно детализирует и углубляет наши представления о круговороте воды в полупустыне Северного Прикаспия, а также позволяет создать устойчивые лесные культуры с гидрологически неистощительным режимом влагопотребления за счет использования безвозвратно теряемых инфильтрационных вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В агролесомелиоративных системах Джаныбекского стационара, который расположен на тяжелосуглинистых комплексных почвах Северного Прикаспия, исследовали гидрологию почвогрунтов с целью оптимизации лесовыращивания.

Показано, что на этой территории участие грунтовых вод в круговороте влаги под разными типами

почв сильно различается. Роль засоленной воды в эвапотранспирации растительности на солончаковых солонцах и светло-каштановых почвах, расположенных на возвышенных участках, совершенно незначительна, так как ее расход осуществляется в основном в виде физического испарения.

Роль воды из пресных линз локальных понижений рельефа (западины и большие пдины) с лугово-каштановыми почвами достаточно велика и существенно различается в зависимости от их площадей. В небольших западинах, где эта линза изначально маломощна и неустойчива, лесонасаждения полностью ее исчерпывают. Сохранность древостоев здесь зависит от степени дополнительного влагонакопления всей почвенно-грунтовой толщей за счет частого снегосбора и зимне-весеннего поверхностного притока талых вод.

Целинные большие пдины заполняются талой водой лишь периодически, через каждые несколько лет, инфильтрация этой влаги пополняет пресные линзы и расходуется на горизонтальный отток по подстилающему песчаному горизонту, вызывая одновременный, гидростатически обусловленный, сезонный вертикальный подъем уровня воды под засоленными типами почв.

На облесенных пдинах под массивными лесонасаждениями в пресной линзе превалирует десуктивный расход, который вызывает ее исчерпание в период от 22 до 27 лет до критического для деревьев уровня. Это связано с тем, что ежегодное замещение воды в срединной части древостоя происходит за счет гидростатического вертикального восходящего потока влаги из подстилающего песчаного горизонта в выположенное дно депрессионной воронки в линзе. В опушечных рядах, а также в узких лесополосах и под отдельными небольшими куртинами такое замещение осуществляется за счет бокового подтока пресной воды из-под целинной части пдины по заметному уклону депрессионной воронки.

Проведенные исследования впервые раскрывают общий сценарий климатогенного динамически-равновесного стояния уровня грунтовых вод на комплексных типах почв Северного Прикаспия при участии в круговороте влаги песчаного подстилающего горизонта под локальными мезопонижениями рельефа (большие пдины) и выявляют возможность создания небольших по размеру устойчивых лесонасаждений с экологически неистощительным гидрологическим режимом, при котором десуктивный расход из пресных линз будет замещаться инфильтрационной водой, безвозвратно теряемой на внутригрунтовой отток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базыкина Г.С.* Водный режим и водный баланс мелиорируемых почв в культурных биогеоценозах // Биогеоценотические основы освоения полупустыни Северного Прикаспия. М.: Наука, 1974. С. 63–147.
- Базыкина Г.С., Максимюк Г.П.* Влияние древесных насаждений на режим и состав почвенно-грунтовых вод под большими пдинами Северного Прикаспия // Вопросы гидрологии и генезиса почв. М.: Наука, 1978. С. 32–45.
- Большаков А.Ф.* Изменение водного режима почв солонцового комплекса при их освоении // Плодородие и мелиорация почв СССР. М., 1964. С. 189–195.
- Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: МГУ, 1998. 272 с.
- Высоцкий Г.Н.* Избранные труды. М.: Сельхозгиз, 1960. 435 с.
- Каменецакая И.В.* Естественная растительность Джаныбекского стационара // Тр. Комплексной научной экспедиции по вопросам полезащитного лесоразведения. М.: Изд-во АН СССР, 1952. Т. 2. Вып. 3. С. 101–162.
- Карандина С.Н., Эрперт С.Д.* Климатические испытания древесных пород в Прикаспийской полупустыне. М.: Наука, 1972. 127 с.
- Киссис Т.Я., Польский М.Н.* Водный режим темноцветной черноземовидной почвы большой пдины под древесным насаждением // Водный режим почв полупустыни. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 81–154.
- Ковда В.А.* Почвы Прикаспийской низменности. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 255 с.
- Колесников А.В.* Водный режим и водный баланс лугово-каштановых почв под колочными лесными насаждениями в Северном Прикаспии // Вестник ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 4. С. 48–58.
- Конюшкова М.В., Козлов Д.Н.* Автоматизированный анализ распространения темноцветных черноземовидных почв в Северном Прикаспии по данным космической съемки (на примере Джаныбекского стационара) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5. С. 46–56.
- Мозесон Д.Л.* Микрорельеф северо-западной части Прикаспийской низменности и его влияние на поверхностный сток // Тр. Института леса АН СССР. 1955. Т. 25. С. 55–65.
- Овсянникова И.Н.* Расход влаги целинной растительностью полупустыни Прикаспия // Почвоведение. 1966. № 12. С. 53–63.
- Овсянникова И.Н.* Влияние лесных колков на солончаковые солонцы. М.: Наука, 1976. 127 с.
- Овсянникова И.Н.* Баланс влаги в черноземовидной почве под насаждением вяза мелколистного // Почвоведение. 1977. № 12. С. 77–87.

- Оловянникова И.Н.* Влияние насаждений вяза приземистого на водно-солевой режим черноземовидных почв депрессий Прикаспийской полупустыни // Лесоведение. 1996. № 3. С. 30–41.
- Оловянникова И.Н., Линдеман Г.В.* О причинах недолговечности культур вяза мелколистного на юго-востоке Европейской России в лучших условиях роста // Лесоведение. 2000. № 5. С. 22–42.
- Распопов М.П.* Опыт расчета баланса грунтовых вод целинных и залежных земель комплексной суглинистой равнины северо-западной части Прикаспийской низменности // Вопросы гидрогеологии целинных и залежных земель и пастбищ отгонного скотоводства. М.: Госгеолтехиздат, 1956. С. 32–110.
- Роде А.А., Польский М.Н.* Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Тр. Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1961. Т. 56. С. 3–214.
- Роде А.А., Польский М.Н.* Водный режим и баланс целинных почв полупустынного комплекса // Водный режим почв полупустыни. М.: Наука, 1963. С. 5–83.
- Сапанов М.К.* Оценка десукции лесных культур на разных типах почв Северного Прикаспия // Почвоведение. 2000. № 11. С. 1318–1327.
- Сапанов М.К.* Экология лесных насаждений в аридных регионах. Тула: Гриф и К, 2003. 248 с.
- Сапанов М.К.* Причины усыхания культур дуба черешчатого на гидроморфных лугово-каштановых почвах Северного Прикаспия // Лесоведение. 2005. № 5. С. 10–17.
- Сапанов М.К.* Синхронность изменения уровней Каспийского моря и грунтовых вод в Северном Прикаспии во второй половине XX в. // Известия РАН. Сер. географическая. 2007. № 5. С. 82–87.
- Сапанов М.К.* Особенности и экологические последствия потепления климата в полупустыне Северного Прикаспия // Поволжский экологический журнал. 2021. № 1. С. 64–78.
- Сапанов М.К., Сиземская М.Л., Колесников А.В. и др.* Экологические особенности лесовыращивания в аридных регионах России и Китая // Поволжский экологический журнал. 2010. № 2. С. 195–203.
- Сенкевич Н.Г., Оловянникова И.Н.* Интродукция древесных растений в полупустыне Северного Прикаспия. М.: ЦНИЭИуголь, 1996. 180 с.
- Сиземская М.Л.* Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 276 с.
- Сиземская М.Л., Бычков Н.Н.* Солевое состояние лугово-каштановых почв Северного Прикаспия в условиях подъема уровня грунтовых вод // Почвоведение. 2005. № 5. С. 543–549.
- Соколова Т.А., Сиземская М.Л., Толмешта И.И., Сапанов М.К., Субботина И.В.* Динамика солевого состояния целинных почв полупустыни Северного Прикаспия в связи с многолетними колебаниями уровня грунтовых вод (на примере почв Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН) // XIX Чтения памяти В.Н. Сукачева “Экологические процессы в аридных биогеоценозах”. М., 2001. С. 113–132.
- Шеин Е.В., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В.* Гидрология почв агроландшафтов: количественное описание, методы исследования, обеспеченность почвенных запасов влаги // Почвоведение. 2021. № 9. С. 1076–1084.
- Bradford J., Schlaepfer D., Lauenroth W., Burke I.* Shifts in plant functional types have time-dependent and regionally variable impacts on dryland ecosystem water balance // J. of Ecology. 2014. V. 102. № 6. P. 1408–1418.
- Fleckenstein J., Krause St., Hannah D., Boano F.* Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics // Advances in Water Resources. 2010. V. 33. № 11. P. 1291–1295.
- Gleeson T., Cuthbert M., Ferguson G., Perrone D.* Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2020. V. 48. P. 431–463.
- Kollet S.J., Maxwell R.M.* Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model // Advances in Water Resources. 2006. V. 29. № 7. P. 945–958.
- Quichimbo E.A., Singer M.B., Michaelides K. et al.* DRYP 1.0: A parsimonious hydrological model of DRYland Partitioning of the water balance // Geoscientific Model Development. 2021. № 14. P. 6893–6917.
- Sophocleous M.* Interactions between groundwater and surface water: the state of the science // Hydrogeology J. 2002. V. 10. P. 52–57.
- Zhou Y., Li W.* A review of regional groundwater flow modeling // Geoscience Frontiers. 2011. V. 2. № 2. P. 205–214.

Ensuring Sustainable Water Supply of Forest Plantations on Intrazonal Gleyic Kastanozems of the Northern Caspian Sea Region

M. K. Sapanov*, M. L. Sizemskaya

*Institute of Forest Science of the RAS,
Sovetskaya st. 21, Uspenskoe, Moscow Oblast, 143030 Russian Federation*

**E-mail: sapanovm@mail.ru*

Groundwater level, mineralisation and gradients were studied under different types of soils occupied by virgin field and forest vegetation to substantiate the possibility of creating sustainable forest stands. Summarised were the results of studying the characteristics of water cycle on saline haplic kastanozems and sodic solonetz soils, as well as on desalinated gleyic kastanozems. Vertical multidirectional moisture exchange with the underlying sandy horizon along local meso-depressions of the relief (depressions with meadow-chestnut soils) was demonstrated: descending during infiltration of thaw water and ascending as a result of an updraft by massive forest plantations. Explored has been the possibility of creating hydrologically neutral sustainable small groves and narrow shelter belts in the depressions, their water supply ensured by infiltrating thaw water, which has been historically irretrievably lost to groundwater outflow through the underlying sandy horizon.

Keywords: arid region, meso-depressions, fresh water lens, forest plantations, water exchange, underlying sandy horizon.

REFERENCES

- Bazykina G.S., Maksimuk G.P., Vliyanie drevesnykh nasazhdenii na rezhim i sostav pochvenno-gruntovykh vod pod bol'shimi padinami Severnogo Prikaspiya (The influence of tree plantations on the regime and composition of soil and groundwater under large depressions of the Northern Caspian region), In: *Voprosy gidrologii i genezisa pochv* (Issues of hydrology and soil genesis), Moscow: Nauka, 1978, pp. 32–45.
- Bazykina G.S., Vodnyi rezhim i vodnyi balans melioriruemykh pochv v kul'turnykh biogeotsenozakh (Water regime and water balance of reclaimed soils in cultural biogeocenoses), In: *Biogeotsenoticheskie osnovy osvoeniya polupustyni Severnogo Prikaspiya* (Biogeocenotic foundations of development of the semi-desert of the Northern Caspian region), Moscow: Nauka, 1974, pp. 63–147.
- Bol'shakov A.F., Izmenenie vodnogo rezhima pochv solontsovogo kompleksa pri ikh osvoenii (Changes in the water regime of solonetz soils during their development), In: *Plodorodie i melioratsiya pochv SSSR* (Fertility and melioration of soils in the USSR), Moscow, 1964, pp. 189–195.
- Bradford J., Schlaepfer D., Lauenroth W., Burke I., Shifts in plant functional types have time-dependent and regionally variable impacts on dryland ecosystem water balance, *J. of Ecology*, 2014, Vol. 102, No. 6, pp. 1408–1418.
- Fleckenstein J., Krause St., Hannah D., Boano F., Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics, *Advances in Water Resources*, 2010, Vol. 33, No. 11, pp. 1291–1295.
- Gleeson T., Cuthbert M., Ferguson G., Perrone D., Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2020, Vol. 48, pp. 431–463.
- Kamenetskaya I.V., Estestvennaya rastitel'nost' Dzhanybekskego stantsionara (Natural vegetation of the Dzhanybek station), *Trudy Kompleksnoi nauchnoi ekspeditsii po voprosam polezashchitnogo lesorazvedeniya*, Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1952, Vol. 2, Issue 3, pp. 101–162.
- Karandina S.N., Erpert S.D., *Klimaticheskoe ispytanie drevesnykh porod v Prikaspiiskoi polupustyne* (A climatic experiment on tree species in the Caspian desert), Moscow: Nauka, 1972, 128 p.
- Kissis T.Y., Vodnyi rezhim temnotsvetnoi chernozemovidnoi pochvy bol'shoi padiny pod drevesnym nasazhdeniem (Water regime of dark chernozem-like soil of a big wooded gully), In: *Vodnyi rezhim pochv polupustyni* (Water regime of semi-desert soils), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, pp. 84–126.
- Kolesnikov A.V., Vodnyi rezhim i vodnyi balans lugovo-kashtanovykh pochv pod kolochnymi lesnymi nasazhdeniyami v Severnom Prikaspii (Water regime and water balance of meadow-chestnut soils under separated forest stands in the northern Caspian Sea Region), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2019, No. 4, pp. 48–58.

- Kollet S.J., Maxwell R.M., Integrated surface–groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model, *Advances in Water Resources*, 2006, Vol. 29, No. 7, pp. 945–958.
- Konyushkova M.V., Kozlov D.N., Avtomatizirovannyi analiz rasprostraneniya temnotsvetnykh chernozemovidnykh pochv v Severnom Prikaspii po dannym kosmicheskoi s"emki (na primere Dzhanybetskogo statsionara (Automated analysis of the geographic distribution of chernozem-like dark-colored soils in the Northern Caspian lowland on the basis of space-borne imagery (the case study at the Dzhanybek research station)), *Aridnye ekosistemy*, 2010, Vol. 16, No. 545, pp. 46–56.
- Kovda V.A., *Pochvy Prikaspiiskoi nizmennosti (severo-zapadnoi chasti)* (Soils of the Caspian depression (north-western part)), Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1950, 255 p.
- Mozeson D.L., Mikrorel'ef severo-zapadnoi chasti Prikaspiiskoi nizmennosti i ego vliyanie na poverkhnostnyi stok (Microrelief of the northwestern part of the Caspian lowland and its influence on surface runoff), *Trudy Instituta lesa AN SSSR*, 1955, Vol. 25, pp. 55–65.
- Olovyannikova I.N., Balans vlagi v chernozemovidnoi pochve pod nasazhdeniem vyaza melkolistnogo (Water balance in chernozem-like soil of Chinese elm stand), *Pochvovedenie*, 1977, No. 12, pp. 77–87.
- Olovyannikova I.N., Lindeman G.V., O prichinakh nedolgovechnosti kul'tur vyaza melkolistnogo na yugovostoke Evropeiskoi Rossii v luchshikh usloviyakh rosta (On the reasons for the short life of small-leaved elm crops in the south-east of European Russia under the best growing conditions), *Lesovedenie*, 2000, No. 5, pp. 22–42.
- Olovyannikova I.N., Raskhod vlagi tselinnoi rastitel'nost'yu polupustyni Prikaspiya (Moisture consumption by virgin vegetation of the Caspian semi-desert), *Pochvovedenie*, 1966, No. 12, pp. 53–63.
- Olovyannikova I.N., *Vliyanie lesnykh kolkov na solonchakovyie solontsy* (The effect of forest outliers on solonchak solonchaks), Moscow: Nauka, 1976, 124 p.
- Olovyannikova I.N., Vliyanie nasazhdenii vyaza prizemistogo na vodno-solevoi rezhim chernozemovidnykh pochv depressii Prikaspiiskoi polupustyni (The effect of Siberian elm forests on water-salt metabolism of chernozem-like soils of depressions in Caspian desert), *Lesovedenie*, 1996, No. 2, pp. 30–41.
- Quichimbo E.A., Singer M.B., Michaelides K. et al., DRYP 1.0: A parsimonious hydrological model of DRYland Partitioning of the water balance, *Geoscientific Model Devevelopment*, 2021, No. 14, pp. 6893–6917.
- Raspopov M.P., Opyt rascheta balansa gruntovykh vod tselinnykh i zaleznykh zemel' kompleksnoi suglinistoi ravniny severo-zapadnoi chasti Prikaspiiskoi nizmennosti (Experience in calculating the groundwater balance of virgin and fallow lands of the complex loamy plain of the northwestern part of the Caspian lowland), In: *Voprosy gidrogeologii tselinnykh i zaleznykh zemel' i pastbishch otgonnogo skotovodstva* (Issues of hydrogeology of virgin and fallow lands and pastures of transhumance), Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1956, pp. 32–110.
- Rode A.A., Pol'skii M.N., Pochvy Dzhanybetskogo statsionara, ikh morfologicheskoe stroenie, mekhanicheskii i khimicheskii sostav (Soils of Dzhanybek station: morphology, structure, grain size and chemical composition), In: *Pochvy polupustyni Severo-Zapadnogo Prikaspiya i ikh melioratsiya. Po rabotam Dzhanybetskogo statsionara* (Melioration of soils of semi-desert in northwestern Caspian region: studies from Dzhanybek station), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961, pp. 3–214.
- Rode A.A., Vodnyi rezhim i balans tselinnykh pochv polupustynnogo kompleksa (Water regime and balance of virgin soils of the semi-desert complex), In: *Vodnyi rezhim pochv polupustyni* (Water regime of semi-desert soils), Moscow: AN SSSR, 1963, pp. 5–83.
- Sapanov M.K., *Ekologiya lesnykh nasazhdenii v aridnykh regionakh* (Ecology of wood plantings in arid regions), Tula: Grif i K, 2003, 248 p.
- Sapanov M.K., Osobennosti i ekologicheskie posledstviya potepleniya klimata v polupustyne Severnogo Prikaspiya (Peculiarities and ecological consequences of climate warming in the Northern Caspian semi-desert), *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2021, No. 1, pp. 64–78.
- Sapanov M.K., Otsenka desuktzii lesnykh kul'tur na raznykh tipakh pochv Severnogo Prikaspiya (Water Uptake by Trees on Different Soils in the Northern Caspian Region), *Pochvovedenie*, 2000, No. 11, pp. 1318–1327.
- Sapanov M.K., Prichiny usykhanii kul'tur duba chereshchatogo na gidromorfnykh lugovo-kashtanovykh pochvakh Severnogo Prikaspiya (Causes of drying up of *Quercus robur* plantations on hydromorphic meadow-chestnut soils in the Northern Caspian Sea region), *Lesovedenie*, 2005, No. 5, pp. 10–17.
- Sapanov M.K., Sinkhronnost' izmeneniya urovnei Kaspiiskogo morya i gruntovykh vod v Severnom Prikaspii vo vtoroi polovine XX v. (Synchronism of changes of caspian sea level and ground waters in Northern Near-Caspian Sea area at the second part of the XX century), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2007, No. 5, pp. 82–87.
- Sapanov M.K., Sizemskaya M.L., Kolesnikov A.V. et al., Ekologicheskie osobennosti lesovyirashchivaniya v aridnykh regionakh Rossii i Kitaya (Ecological features of forest growing in arid regions of Russia and China), *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2010, No. 2, pp. 195–203.
- Senkevich N.G., Olovyannikova I.N., *Introduktsiya drevesnykh rastenii v polupustyne Severnogo Prikaspiya* (Introduction of trees in semi-desert of northern Caspian region), Moscow: Izd-vo ILAN, 1996, 180 p.
- Shein E.V., Bolotov A.G., Dembovetskii A.V., Gidrologiya pochv agrolandshaftov: kolichestvennoe opisanie, metody issledovaniya, obespechennost' pochvennykh zapasov vlagi (Soil hydrology of agricultural landscapes: quantitative

description, research methods, availability of soil moisture reserves), *Pochvovedenie*, 2021, No. 9, pp. 1076–1084.

Sizemskaya M.L., Bychkov N.N., The salt status of meadow-chestnut soils in the Northern Caspian region upon a rise in the ground-water level, *Eurasian Soil Science*, 2005, Vol. 38, No. 5, pp. 480–485.

Sizemskaya M.L., *Sovremennaya prirodno-antropogennaya transformatsiya pochv polupustyni Severnogo Prikaspiya* (Recent soil alterations in northern Caspian region under natural and human impacts), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2013, 276 p.

Sokolova T.A., Sizemskaya M.L., Tolpeshta I.I., Sapunov M.K., Subbotina I.V., *Dinamika solevogo sostoyaniya tselinnykh pochv polupustyni Severnogo Prikaspiya v svyazi s mnogoletnimi kolebaniyami urovnya gruntovykh vod (na primere pochv Dzhanybekskogo statsionara Instituta lesovedeniya RAN)* (Dynamics of the salt state of virgin soils of the Northern Caspian semi-desert in

connection with long-term fluctuations in groundwater levels (using the example of soils from the Dzhanybek station of the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences)), *XIX Chteniya pamyati V.N. Sukacheva "Ekologicheskie protsessy v aridnykh biogeotsenozakh"* (XIX Readings in memory of V.N. Sukachev "Ecological processes in arid biogeocenoses".), Moscow, 2001, pp. 113–132.

Sophocleous M., Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeology Journal*, 2002, Vol. 10, pp. 52–57.

Vorob'eva L.A., *Khimicheskii analiz pochv* (Chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1998, 271 p.

Vysotskii G.N., *Izbrannye Trudy* (Selecta), Moscow: Sel'khozgiz, 1960, 435 p.

Zhou Y., Li W., A review of regional groundwater flow modeling, *Geoscience Frontiers*, 2011, Vol. 2, No. 2, pp. 205–214.