

*ISSN 1993-3916*

**Том 29      Номер 2 (95)      Июнь 2023**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Журнал освещает фундаментальные исследования и результаты прикладных работ по проблемам аридных экосистем и борьбы с антропогенным опустыниванием в региональном и глобальном масштабах. Издается с 1995 года по решению Бюро Отделения общей биологии Российской академии наук.



**МОСКВА**  
**Товарищество научных изданий КМК**  
**2023**

© Журнал основан в 1995 г.  
Издается при поддержке  
Прикаспийского института биологических ресурсов и  
Института геологии Дагестанского научного центра Российской академии наук,  
Института водных проблем Российской академии наук,  
Товарищества научных изданий КМК  
и содействии региональных отделений секции  
"Проблемы изучения аридных экосистем и борьбы с опустыниванием"  
Научного совета "Проблемы экологии биологических систем"  
отделения биологических наук Российской академии наук.  
Подписной индекс русской версии журнала 39775 в 1 томе каталога «Пресса России»

**Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) ELIBRARY.ru, в базу научной электронной библиотеки “КИБЕРЛЕНИНКА” CYBERLENINCA.ru, в базу Российской государственной библиотеки (РГБ) rsl.ru, в базу данных Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук (БЕН РАН), в базу данных Russian Science Citation Index, размещенную на платформе Web of Science, входит в число реферируемых журналов и Базы данных, ВИНИТИ, Google Scholar, AGRICOLA, EBSCO Discovery Service, OCLC, Summon by ProQuest, включен в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, передается в Российскую книжную палату, переводится на английский и распространяется издательством Springer за пределами России.**  
Сведения о журнале ежегодно поступают в международную справочную систему «Ulrich’s Periodicals Directory».  
Информация о журнале, правила для авторов располагаются на сайте <http://aridecosystems.ru/>;  
архив полнотекстовых статей по адресам: <http://aridecosystems.ru/архивы/>;  
[http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=8404&code=99990527](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=8404&code=99990527),  
<https://cyberleninka.ru/journal/n/aridnye-ekosistemy#/1009295>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ОТДЕЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК РАН  
ПРИКАСПИЙСКИЙ ИНСТИТУТ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ  
ДАГЕСТАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН  
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РАН  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ ДАГЕСТАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

*СЕКЦИЯ "Проблемы изучения аридных экосистем и борьбы с опустыниванием"  
Научного совета по проблемам экологии биологических систем*

## **АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ**

**Том 29, № 2 (95), 2023, июнь**

Журнал основан в январе 1995 г.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор

доктор биологических наук, профессор

З.Г. Залибеков\*\*

Заместитель главного редактора

доктор географических наук

Ж.В. Кузьмина\*

Редакционная коллегия:

Б.Д. Абатуров, С.-В. Брекле (Германия), К.Б. Гонгальский, А. Джилили (Китай),  
Т.В. Дикарева, Л.А. Димеева (Казахстан), Т.Д. Зинченко, И.С. Зонн, К.Н. Кулик,  
Г.С. Куст, В.В. Неронов, К.З. Омаров, Л. Орловская (Израиль), Н.И. Рабазанов,  
А.А. Тишков, В.И. Черкашин, А.А. Чибилев, З.Ш. Шамсутдинов

Редакционный совет:

Д.Б. Асгерова, А.Б. Биарсланов, Э.А. Рустамов (Туркмения), Н.З. Шамсутдинов

Ответственные за выпуск:

Ж.В. Кузьмина\*, О.С. Гринченко\*(*Ответственный секретарь*)

Адреса редакции:

\*Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, ИВП РАН

Телефон: (499) 135-70-41. Факс: (499) 135-54-15

E-mail: arid.journal@yandex.ru

\*\*Россия, 367025, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 45, ПИБР ДНЦ РАН

Телефон: (872-2) 67-09-83

E-mail: arid\_journal@mail.ru

Москва: Товарищество научных изданий КМК

**2023**

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 29, номер 2 (95), 2023 июнь

### СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

- Экстремальная засуха на Восточно-европейской равнине в период потепления середины XX столетия: климатические характеристики и аналоги в условиях современного климата  
*В.В. Попова, Д.Д. Бокучава, Т.А. Матвеева* 3-11
- К вопросу о математическом моделировании процесса испарения  
*А.Н. Салугин* 12-19
- Влияние почвенно-климатических факторов на параметры грунтовых вод склонового агроландшафта  
*А.С. Бузуева, Д.И. Губарев, М.Ю. Несветаев, В.А. Куликова* 20-28
- Сезонная и годовая динамика гидротермических условий в восточной природно-сельскохозяйственной зоне Ростовской области в 1961-2020 гг.  
*В.Н. Гудко, А.В. Усатов, К.В. Азарин* 29-35
- О почвенно-географическом феномене Европейской части юга России  
*З.Г. Залибеков, С.А. Мамаев, Р.А. Магомедов, М.А. Мусаев, П.Д. Мусалаева* 36-44
- О влиянии климатических условий на региональные аспекты адаптации системы использования почв  
*М-Р. А. Казиев, С.Н. Имашева, С.А. Теймуров, З.А. Баламирзоева* 45-52
- Свойства почв и запасы органического углерода в почвах прибрежных аридных экосистем оазиса на юго-востоке Туниса  
*Б. Абделхахим, О. Зохра, И. Виссем, Б. Надхем* 53-66
- Многолетняя динамика запасов живой надземной фитомассы степных фитоценозов после пожара (на примере участка «Буртинская степь» заповедника «Оренбургский»)  
*Г.Х. Дусаева, О.Г. Калмыкова* 67-76
- Состояние ценопопуляций *Xylosalsola chiwensis* (Popov) Akhani & Roalson и *Scorzonera bungei* Krasch. & Lipsch. на плато Устюрт (Узбекистан)  
*Н.К. Рахимова, Т. Рахимова, Х.Ф. Шомуродов, В.К. Шарипова* 77-84
- Географические связи, пути миграции и места зимовки серых журавлей Северного Подмосковья  
*Т.В. Свиридова, О.С. Гринченко, М. Викельски, Е.И. Ильяшенко* 85-97

### ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ

- Поедаемость растительных сообществ как один из критериев качественной оценки пастбищ Монголии  
*Е.В. Данжалова, Э. Ариунболд, Н.И. Дорофеев, Д. Мягмарсурэн, С.Н. Бажа* 98-108
- Оценка влияния вольерного содержания животных на экологическое состояние почв  
*А.А. Гобарова, К.Ш. Казеев, А.В. Жадобин, А.Н. Федоренко, С.И. Колесников* 109-117
- Фракционный состав соединений металлов и серы в верхнем слое почв зон воздействия террикона угольной шахты (Среднерусская лесостепь)  
*И.Н. Семенов, А.В. Шарипова, С.А. Леднев, Т.В. Королева* 118-127
- Об экологических аспектах использования геотермальных вод в условиях засушливого климата  
*А.С. Курбанисмаилова, Г.Я. Ахмедов* 128-135

**ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ЗАСУХА НА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЕ  
В ПЕРИОД ПОТЕПЛЕНИЯ СЕРЕДИНЫ XX СТОЛЕТИЯ: КЛИМАТИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ И АНАЛОГИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА**

© 2023 г. В.В. Попова\*, Д.Д. Бокучава\*\*, Т.А. Матвеева\*\*

*\*Институт географии РАН*

*Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29*

*\*\*Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН*

*Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. E-mail: valeria\_popova@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 10.01.2023. Принята к публикации 13.01.2023.

Беспрецедентные аномалии годового стока Волги и Северной Двины 1920-1940 гг. рассматриваются в контексте глобального потепления середины XX столетия и климатических экстремумов последних десятилетий. Изучение гидрологических и климатических характеристик показывает, что на Восточно-Европейской равнине период глобального потепления проявился в многолетней засухе 1934-1940 гг., которая, согласно классификации Палмера, не имеет аналогов в этом регионе по интенсивности и продолжительности и стала причиной экстремальных гидрологических событий. Результаты проведенного спектрального анализа изменчивости речного стока, а также анализа эмпирических ортогональных функций аномалий атмосферного давления, позволяют считать, что ближайшими подобными явлениями, но значительно уступающими по воздействию на природную среду, можно считать засухи 1972 и 2010 гг.

*Ключевые слова:* потепление середины XX столетия, Восточно-Европейская Равнина, речной сток, экстремумы, засуха, индекс Палмера, циркуляционные условия.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-3-11**

**EDN: CA1LXD**

Глобальное потепление середины XX века (ПСДВ) является второй, по сравнению с современным потеплением, положительной климатической аномалией и представляет большой интерес для климатологов. Характерными признаками обоих эпизодов являются ярко выраженные аномалии приземной температуры воздуха (ПТВ) в высоких широтах Северного Полушария (Бокучава, Семенов, 2018). Резкий подъем температуры поверхности океана, в частности Северной Атлантики и описывающей ее аномалии моды Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО), с пиком в 1930-е гг. рассматривается в качестве основного фактора ПСДВ (Bokuchava, Semenov, 2022; Chylek et al., 2016; Hegerl et al., 2018; Tokinaga et al., 2017).

Анализ региональных климатических аномалий, зафиксированных в этот период инструментальными наблюдениями или косвенными данными, изучение их связи с глобальными изменениями, характеризующими ПСДВ, предоставляют возможности для изучения механизмов внутренней естественной климатической изменчивости и условий возникновения подобных аномалий в настоящем и будущем, на фоне продолжающегося антропогенного потепления климата. Особое значение приобретает изучение климатических событий, связанных с рисками для природной среды и общества.

Исследования региональных проявлений ПСДВ в умеренных и высоких широтах Евразии, в основном сфокусированы на зимнем сезоне и проблеме сокращения площади морского арктического льда, а также связанных с ним аномалий атмосферной циркуляции (Hegerl et al., 2018; Wegmann et al., 2018, 2020). В то же время, зафиксированные в многолетних рядах гидрологических наблюдений беспрецедентные подъем и сокращение годового стока Волги и Северной Двины, свидетельствуют о крупномасштабных аномалиях увлажнения в период 1920-1940 гг.

Учитывая, что крупномасштабный речной сток является прямым показателем увлажненности, аномалии водности крупнейших рек Восточно-Европейской равнины, Волги и Северной Двины, в

1920-1940-х гг. указывают на уникальность этого периода, а его хронология предполагает связь с ПСДВ и его возможными механизмами. Цель исследования состоит в анализе климатических характеристик и циркуляционных условий этих событий, рассматривая их в контексте ПСДВ и его вклада в региональные аномалии увлажнения на северо-западе Евразии. В задачи исследования входит получение количественных характеристик гидротермических показателей, в том числе, индекса засух, и проведение сравнительного анализа событий периода ПСДВ с подобными явлениями на Восточно-Европейской равнине в конце XIX – начале XX века, их частотно-временными особенностями и циркуляционными условиями.

### Материалы и методы

Использовались сеточные архивы данных наблюдений за приповерхностной температурой – HadCRUT5.0 (Climatic Research Unit Dataset, 2022) и GISTEMP v4 (GISS Surface Temperature Analysis, 2022); атмосферными осадками – CRU TS4.05 (Climatic Research Unit Dataset, 2022), а также индексом суровости засухи Палмера (PDSI) (Climatic Research Unit Dataset, 2022). Для сравнения изменений температуры из разных источников также использовались данные реанализов XX века: NOAA-CIRES Twentieth-Century Reanalysis и реанализы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) ERA20C и CERA20C (ECMWF Dataset, 2022).

Для выявления циркуляционной структуры, «ответственной» за формирования жары и засухи на Восточно-Европейской равнине, применялся анализ эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) изменчивости аномалий атмосферного давления на уровне моря по данным наблюдений из сеточного архива HadSLP2 (Hadley Centre Sea Level Pressure Dataset, 2022). Спектральный анализ изменчивости годового стока Волги и осредненного за лето (июнь-сентябрь) индекса Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation, NAO) за 1882-2007 гг. в среднем, а также по 64-летним скользящим средним, проводился по методу преобразования Фурье; количество степеней свободы для определения доверительного интервала функции спектральной плотности и уровня значимости функции взаимной когерентности принималось равным  $2N/m$ .

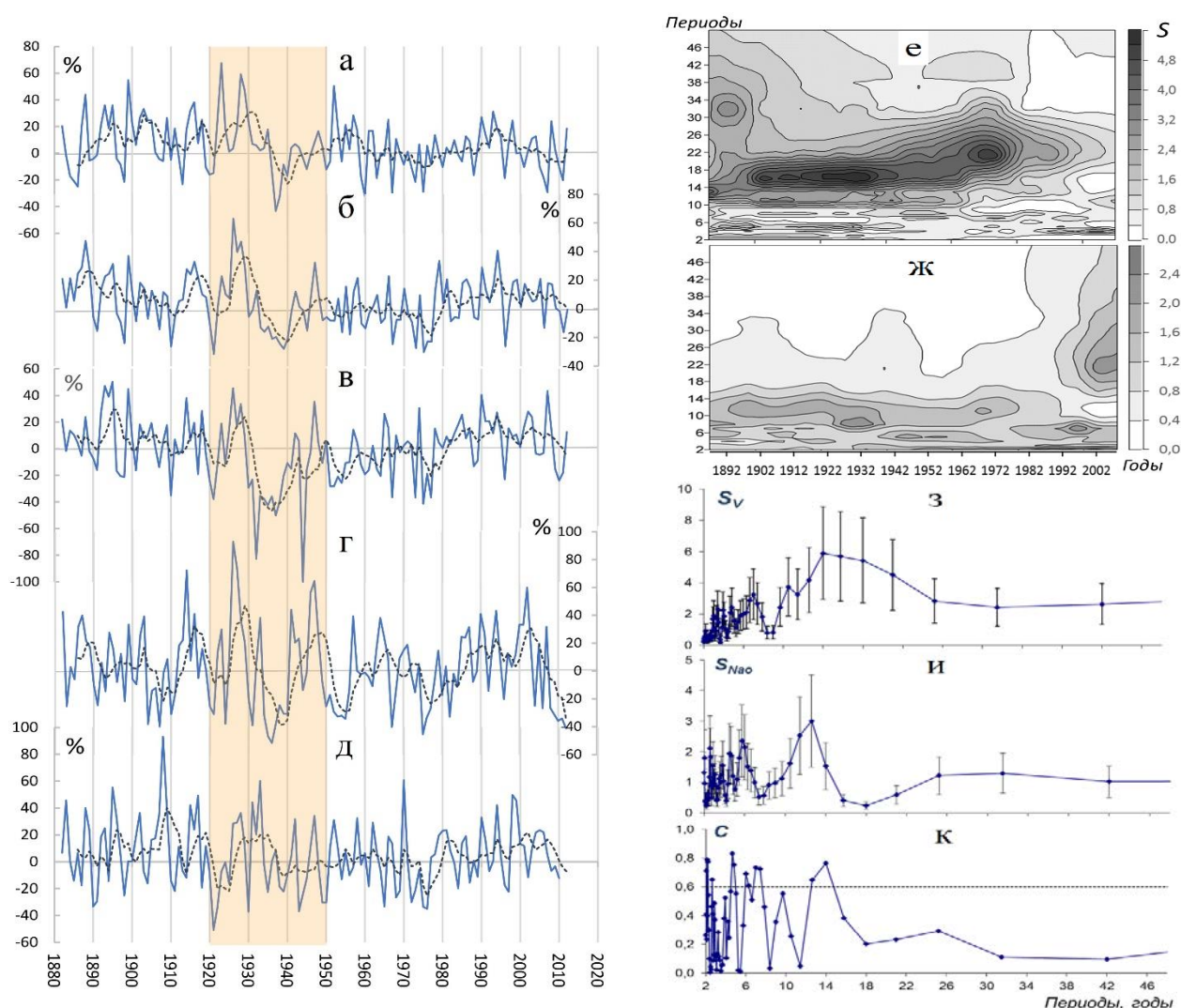
### Результаты и обсуждение

Многолетние данные о годовом стоке Северной Двины и Волги, а также ее притоков Вятки и Белой (рис. 1 а-д), свидетельствуют об экстремально высокой амплитуде аномалий и резком переходе от режима переувлажнения к засушливости в течение 1920-1940 гг. В бассейне Волги многоводный период, не прерывавшийся в течение 1922-1929 гг. был отмечен абсолютным максимумом за период наблюдений в 1926 г., с величиной аномалии около 60% (от нормы за 1961-1990 гг.), а также максимумами 5% обеспеченности в 1927 и 1928 гг., до 40-50% от нормы. Резкое падение водности с 1930 привело к 9-летнему периоду непрерывного дефицита годового стока Волги (в среднем около 18%), который стал абсолютным максимумом продолжительности маловодья за период наблюдений; следующий за ним по рангу маловодный период 1954-1957 гг. составлял 4 года, при дефиците стока 8%.

В ходе годового стока Вятки и Белой, притоков Волги, принадлежащих наиболее многоводному бассейну Камы, описанные явления имеют еще более выраженный характер (рис. 1 в, г). В бассейне Вятки, маловодный период 1930-1940-х гг., который продолжался более 10 лет при среднем дефиците водности около 30%, до настоящего времени остается уникальным явлением. На востоке, в бассейне Белой, аномалии стока 1926-1927 гг. и амплитуда падения водности к середине 1930-х гг. достигали 80-90% и 120-130% от нормы, соответственно. Западнее, в бассейне Оки, напротив, эти события практически не проявлялись (рис. 1 д), что указывает на юго-восточную составляющую в направление переноса воздушных масс, ответственных за формирование засухи.

Аномалии стока Северной Двины в этот период (рис. 1 а) свидетельствуют, что масштабы описанных гидроклиматических экстремумов распространялись на север почти до самого побережья Баренцева моря. В силу соотношения площадей водосборов (1: 4) и, возможно, географического положения относительные аномалии годового стока Северной Двины и их амплитуда выше, а продолжительность маловодной и многоводной фаз короче по сравнению с Волгой. Непрерывный дефицит стока в бассейне Северной Двины продолжался в течение 5 лет, 1936-1940 гг., а пиковые значения этого события, в 1936 и 1937 гг., с дефицитом 43% и 33%, соответственно, до сих пор

остаются первым и вторым по рангу повторяемости за период наблюдений. Многоводный период практически распадается на два периода – 1922-1924 гг., с абсолютным максимумом аномалии годового стока 68% (от нормы за 1961-1990 гг.) в 1923 г., и 1927-1930 гг., с максимумом 59% в 1928 г.



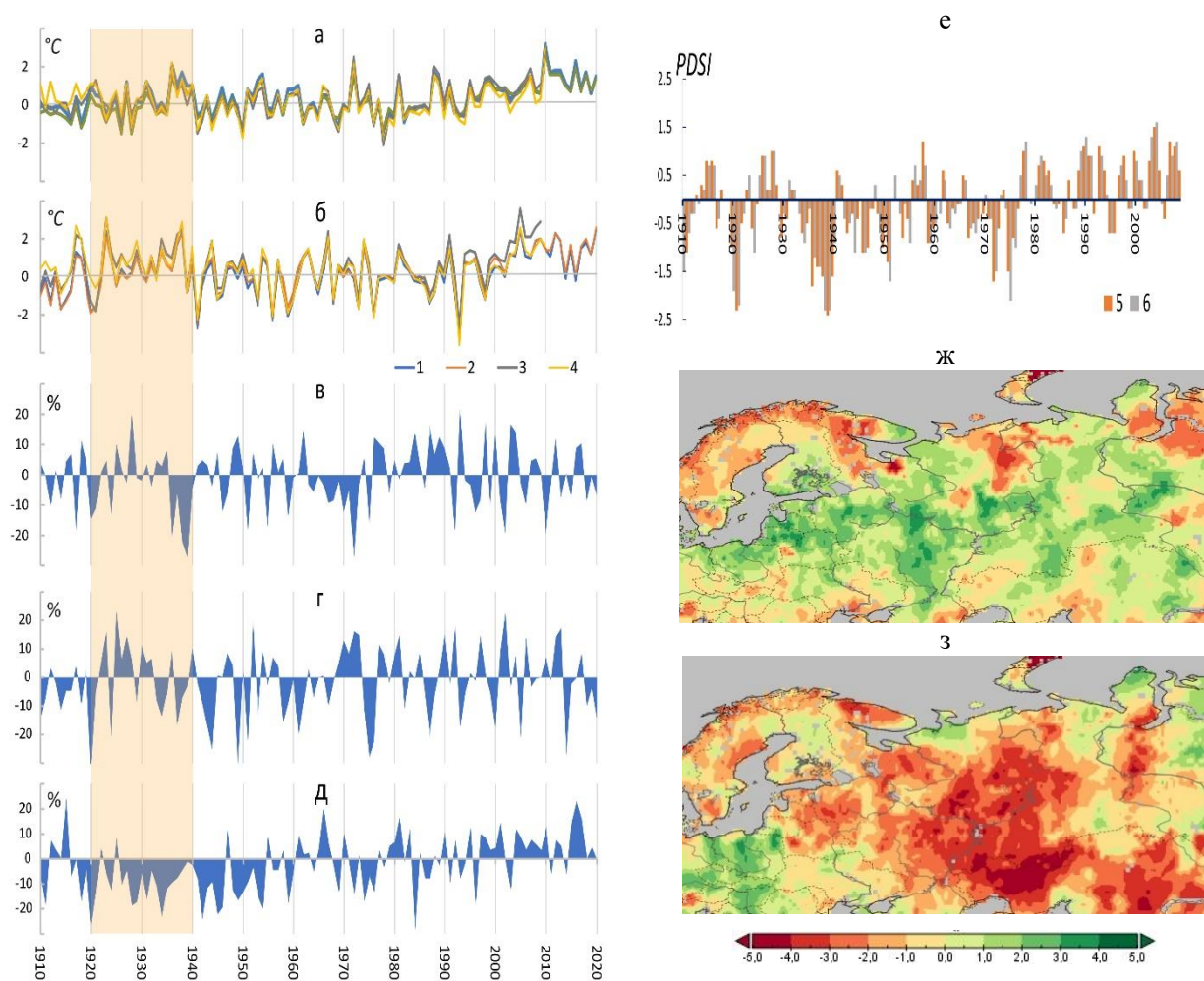
**Рис. 1.** Особенности изменчивости речного стока в период потепления середины XX века, годовой сток в % от нормы за 1961-1990 гг. Условные обозначения: а – Северной Двины, б – Волги, в – Вятки, г – Белой, д – Оки; е, з – спектры годового стока Волги, ж, и – летнего (июнь-сентябрь) индекса NAO по 64 скользящим средним (е, ж), з, и – средние за 1892-2007 гг., к – функция взаимной когерентности годового стока Волги и летнего индекса NAO, пунктир (а-д) – 5-летние скользящие средние значения, вертикальные линии (з, и) – 90% доверительный интервал, горизонтальная линия (к) – порог статистической значимости ( $p \leq 0.05$ ).

Скользящие спектры стока Волги (рис. 1 е) демонстрируют максимальную за период наблюдений концентрацию дисперсии на временном отрезке 1920-1940 гг. в области периодичностей около 14-18 лет, которая отчетливо проявляется в средней спектральной функции за 1892-2007 гг. (рис. 1 е, з). Сопоставление со скользящим спектрами летнего индекса NAO (июнь-сентябрь) показывает пик дисперсии в этот период (рис. 1 ж), а также статистически значимую взаимную когерентность в области периодичностей 10-14 лет (рис. 1к), что может указывать на летние условия циркуляции и вызванные ими климатические аномалии как причину аномалий речного стока 1920-1940 гг.

Анализ данных сеточных архивов данных наблюдений, а также реанализов XX столетия (рис. 2 а, б), подтверждает роль летних температурных аномалий (рис. 2 а) в формировании условий



резкого перехода от режима избыточного увлажнения к продолжительной засухе на территории Восточно-Европейской равнины и вызванных ими экстремумов водности Северной Двины и Волги в 1920-1940-х гг. Изменения температуры и осадков на территории Европейской равнины за период 1910-1950 гг. демонстрируют летние экстремумы обоих знаков – холодное и избыточно влажное лето, в 1926 и 1928 гг., и продолжительную засуху на фоне аномальной жары, в 1931, 1936-1939 гг. (рис. 2 а, б). Скорость роста летней температуры (июнь-август), осредненной в пределах Восточно-Европейской равнины (20-60° с.ш.; 45-70° в.д.), за 20 лет составила 1.4°C. Этот показатель уступает темпам современного летнего потепления с начала 1990-х гг. на 0.6°C, тем не менее, как показывают изменения индекса суровости засухи Палмера (PDSI), темпы роста дефицита влаги и продолжительность засухи на территории Восточно-Европейской равнины (1934-1940 гг.) не имеют аналогов за период наблюдений (рис. 2 е). Аномалии температуры осеннего сезона 1930-х гг. (рис. 2 б), значимые для увлажнения и формирования весеннего речного стока, превосходят по величине летние показатели и, на фоне дефицита осадков (рис. 2 г, д), усиливают почвенную засуху в начале следующего теплого сезона.



**Рис. 2.** Климатические показатели и индекс засушливости Палмера в период потепления середины XX века. Условные обозначения: а-б – изменения приповерхностной температуры по данным 1) HadSTUT.5, 2) GISSTEMP1200, 3) ERA20C, 4) CERA20C в °C, а – в среднем за летний сезон, б – за осенний, в-д – изменения атмосферных осадков CRU TS4.05 в % (от нормы за 1961-1990 гг.), в – за летний сезон, г – за осенний, д – за холодный период (октябрь-апрель) на территории Восточно-Европейской равнины (20-65° с.ш., 45-70° в.д.), е – многолетний ход, 5 – лето, 6 – осень, ж-з – распределение PDSI в среднем за июнь-август в годы избыточного увлажнения в среднем за 1923, 1926, 1927, 1928 гг. (ж), в годы засух в среднем за 1936, 1938, 1939, 1940 гг. (з).



Помимо аномально жарких и сухих летних сезонов, важнейшую роль в формировании засух сыграл дефицит осадков холодного периода, то есть снеготопивости, который продолжался с середины 1990-х гг. до середины 1950-х гг. (рис. 2е). Учитывая, что инструментальные наблюдения за осадками на территории России, которые использовались в архиве CRU TS4.05, до 1950-х гг. могли занижать количество осадков в твердом виде из-за несовершенства измерительного оборудования, сопоставление аномалий осадков холодного периода до и после 1950 гг. было бы некорректным. Тем не менее, анализируя изменения осадков за период ПСДВ, нельзя не отметить, что холодные сезоны 1928-1936 гг. на Восточно-Европейской равнине (рис. 2е) были наименее обеспеченными в отношении осадков и, следовательно, запаса воды в снеге, являющимся основным источником питания рек умеренного пояса и запаса влаги в почве к началу вегетации.

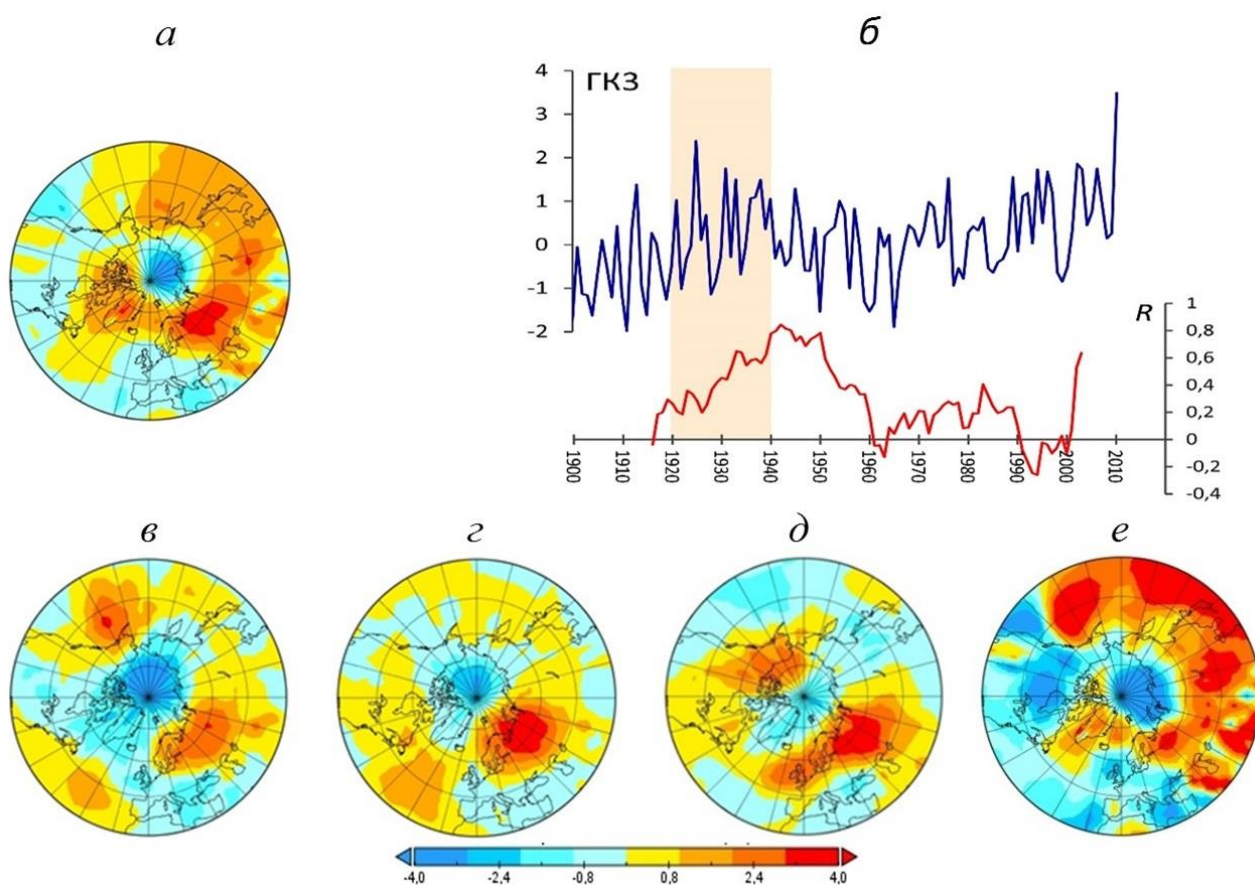
Летом (июнь-август) минимальные значения PDSI в среднем по территории (рис. 2 е) не опускаются ниже -3, что по классификации Палмера (Palmer, 1965) соответствует умеренной засушливости. При этом пространственное распределение PDSI в среднем за 4 наиболее засушливых года (рис. 2 з) показывает, что на значительной части территории и особенно в областях питания Волги и Северной Двины – в бассейнах Камы и Вычегды, на Верхней и Средней Волге, значения индекса опускаются ниже -4 (локально ниже -5) и свидетельствуют о *сильной, местами, экстремальной засухе* по классификации Палмера. Одновременно более суровая, *экстремальная засуха* с устойчивыми значениями PDSI ниже -5, наблюдалась на значительной территории на северо-западе Казахстана.

В годы избыточного увлажнения (рис. 2 ж) аномалии PDSI меняются на противоположные не вполне симметрично – по абсолютному значению они не превышают 4 в районах максимального значения индекса, на севере и западе Волжского бассейна, и таким образом, не выходят из градации *сильное переувлажнение*. В среднем по территории Восточно-Европейской равнины (рис. 2 ж) величина положительных аномалий PDSI в 1923-1928 гг., также как и летних осадков (рис. 2 в), значительно уступает отрицательным аномалиям в 1936-1940 гг. Полученные регрессионные оценки показывают, что в период 1920-1950 гг. аномалии PDSI, в среднем по площади водосборов, объясняют 80% изменчивости годового стока Волги, включая продолжительный маловодный период 1931-1940 гг., причем основной вклад, более 70%, принадлежит летнему сезону.

Продолжительность периода аномалий летней температуры и дефицита увлажнения, который охватывает вторую половину 1930-х гг., очевидно, указывает на факторы планетарного масштаба, имеющие инерционный характер. К таким факторам относятся аномалии температуры поверхности океана, в частности Северной Атлантики, которые выражаются индексом АМО и имеют характерные низкочастотные колебания с периодом около 60-80 лет. В 1930-е гг. наблюдался пик положительной фазы АМО, и согласно результатам ряда исследований, в том числе, с применением численного моделирования (Chylek et al., 2016), связанные с ней аномалии в Северной Атлантике способны вызывать климатические изменения, диагностируемые в период ПСДВ.

В скользящих спектрах изменчивости индекса NAO, а также годового стока Волги (рис. 1 е, ж) полоса высокой дисперсии с 1910-х до 1980-х гг. и максимумом в 1930-1940-х гг. примерно совпадает с полной фазой АМО и пиком его положительной фазы. Расхождение в областях периодов – для индекса NAO в этот период максимум дисперсии приходится на 10-14 лет, а для стока – на 14-18 лет, ожидаемо, оно связано с процессами перераспределения влаги и инерционностью реакции годового стока на климатические аномалии в пределах обширного бассейна Волги. Связь этих явлений подтверждается функцией взаимной когерентности, которая в области периодов 12-14 лет статистически значима (на уровне  $p \leq 0.05$ ) и достигает 70-80% общей изменчивости между стоком и циркуляцией, описываемой индексом NAO (рис. 1 к). Второй по значимости максимум дисперсии летнего индекса NAO, который приходится на 1970-е гг., также совпадает по времени с аналогичным максимумом в скользящем спектре годового стока Волги (рис. 1 е, ж). В изменении климатических показателей этот период отмечен второй по рангу, после 2010 г., аномалией летней температуры 1972 г. и продолжительным периодом дефицита осадков (рис. 2 а, г). Даже с учетом сильного антропогенного влияния в этот период, для годового стока Волги эти аномалии имели критический характер – они привели к его снижению в 1975-1977 гг. до минимального уровня, сравнимого с концом 1930-х гг. (рис. 1 б, в, г). Отметим, что в отличие от 1930 гг., в начале 1970-х годов АМО находилась в отрицательной фазе, причем на самой низкой отметке.

Следующий за периодом ПСДВ максимум АМО, связанный с положительной фазой этой моды, наблюдался в конце 1990-х – 2000-х гг., и был отмечен резким потеплением на Восточно-Европейской равнине с абсолютным максимумом летней температуры в 2010 году, сопровождавшимся катастрофической жарой и засухой (Мохов, 2011; Попова, 2014). В силу краевых эффектов спектральный анализ не позволяет оценить влияние этих аномалий на спектральную структуру годового стока Волги, но данные наблюдений фиксируют его снижение в этот период, особенно заметное после 2010 г. (Второй оценочный доклад ..., 2014). Анализ ЭОФ изменчивости атмосферного давления (на уровне моря) в летние месяцы (июль-август) во внетропической зоне Северного Полушария (HadSLP.2) за 1900-2010 гг., показывает, что аномалии и 2000-х гг., также как и второй половины 1930-х гг., описываются 3-ей по вкладу в изменчивость пространственной структурой (ЭОФ3) и соответствующей главной компонентой – ГКЗ<sup>1</sup> (рис. 3 а, б).



**Рис. 3.** Циркуляционные условия летнего потепления в середине XX века и в современный период. Условные обозначения: а – поле ЭОФ3, б – ГКЗ изменчивости атмосферного давления и коэффициенты корреляции между ГКЗ и изменениями температуры в среднем за июль-август на Восточно-Европейской равнине, рассчитанные по 15-летним скользящим средним, в – поля аномалий атмосферного давления в 1938 г., в среднем за 1936, 1938, 1939 гг., г – относительно 1923, 1926, 1928 гг., д – 1972 г., е – 2010 г.

Основные очаги ЭОФ3 (рис. 3 а) – обширная антициклоническая аномалия с центром на территории Восточно-Европейской равнины и циклонический очаг в приполярной области тихоокеанского сектора, выделяются на фоне пояса повышенного давления, простирающегося на восток, через Азию на акваторию Тихого океана, и на запад, на атлантический и североамериканский сектор Северного Ледовитого океана и западную часть Северной Атлантики. Во временном ходе этой

<sup>1</sup> ГКЗ — главная компонента, соответствующая 3-ей эмпирической ортогональной функции ЭОФ3 изменчивости атмосферного давления.

циркуляционной структуры, описываемом ГКЗ (рис. 3 б), в 1900-2010 гг., помимо тренда, соответствующего изменению летней температуры на Восточно-Европейской равнине, выделяются аномалии 1920-1930 гг., а также конца 1990-х и 2000-х гг. с абсолютным максимумом в 2010 г. Линейная корреляция между ГКЗ и изменениями приповерхностной температурой в среднем по территории Восточно-Европейской равнины (за июль-август), рассчитанная по 15-летним скользящим средним (рис. 3 б), демонстрирует два максимума – в период ПСДВ (до 0.6-0.8) и в последнее 15-летие (0.5-0.6). Достаточно высокая связь указывает, что структура аномалий давления, описываемая ЭОФЗ, объясняет циркуляционный механизм формирования температурных экстремумов исследуемого региона в период ПСДВ и в период современного потепления. В отношении аномалий 1970-х гг., в частности экстремальной жары 1972 г. эти закономерности не «работают», поскольку корреляция между ГКЗ давления и изменениями температуры не достигает уровня статистической значимости (рис. 3 б).

Сравнивая пространственное распределение аномалий давления летом 1938 и 2010 г. (рис. 3 в, е), помимо сходства дипольной структуры, соответствующей ЭОФЗ, с очагами противоположного знака в центре Восточно-Европейской равнины и в приполярной зоне, можно отметить и существенные различия. В первую очередь, это превосходящие по величине антициклонические аномалии над Тихим океаном, а также аномалия над Гренландией и в атлантическом секторе Арктики в 2010 г., в отличие от 1938 г., когда обширная антициклоническая аномалия наблюдалась в субтропической зоне Северной Атлантики. Еще больше различий показывает сравнение с полем атмосферного давления летом 1972 г. (рис. 3 а, в-е), с циркуляционными аномалиями 2010 г. его объединяет только антициклонический очаг аномалий над Восточно-Европейской равниной, с 1938 г. – помимо этого очага, пониженное давление на севере Атлантики.

Итак, анализ климатических характеристик и индекса засушливости на территории Восточно-Европейской равнины за 1910-2020 гг. показывает, что период ПСДВ, в частности 1920-1940 гг., был отмечен многолетней засухой, последовавшей за непродолжительным периодом повышенного увлажнения. В каталоге сильных засух на территории России и других исследованиях, посвященных этой проблеме (Страшная и др., 2011), 1930-е годы, наряду с 1950-ми и 1990-ми гг., выделяются высокой повторяемостью засух. В то же время зафиксированные в этот период засухи (1931, 1936, 1938, 1939 гг.) не рассматривались как события, выходящие из ряда других 32 сильных засух, наблюдавшихся на Европейской территории России в 1891-2010 гг., и не изучались в контексте глобальных изменений климата, в частности ПСДВ. Проведенный анализ показывает, что дефицит осадков, а также интенсивность и продолжительность периода повторяющихся засух 1934-1940 гг. не имеют аналогов за период наблюдений. Переувлажнение летом 1923, 1926, 1928 гг. не превышало градацию «сильного», но есть вероятность его недооценки имеющимися архивами данных из-за несовершенства измерительных приборов, применявшихся в этот период. В изменчивости речного стока, который в исследуемый период не испытывал существенного антропогенного влияния и по существу является интегральной характеристикой увлажнения на территории водосборов, описанные аномалии отразились в абсолютных экстремумах обоих знаков и резко, в течение менее 10 лет, падении его от высокой фазы к минимуму водности, что до настоящего времени остается уникальным событием. Сравнимым, но значительно уступающим по амплитуде, было сокращение стока Волги в середине 1970-х гг., которое последовало после многолетнего дефицита осадков и засухи 1972 г., которая по температурным показателям превосходит пиковое значение в 1938 г., но уступает абсолютному максимуму 2010 гг.

Подобные явления в период ПСДВ – катастрофические засухи в 1930-х гг. на Великих Равнинах североамериканского континента (Cook et al., 2011; Hegerl et al., 2018; Schubert et al., 2004), а также разрушительное наводнение на Миссиссипи в 1927 г. (Barry, 1997), ранее отмечались за пределами России и на более низких географических широтах. С точки зрения циркуляционных условий эти события связываются с расширением на север ячейки Хэдли и субтропического пояса высокого давления (Brönnimann et al., 2009; Cook et al., 2011). Структура аномалий атмосферного давления, выделенная путем разложения по ЭОФ, как и полученная в результате анализа аномалий давления за годы сильных засух 1930-х гг. (рис. 3 а, в, г), также указывает на расширение субтропического пояса высокого давления над Атлантикой, которое способствует усилению высотных планетарных волн в зоне умеренных широт и, по-видимому, стало одним из факторов

формирования устойчивого антициклона над центром Восточно-Европейской равнины. В сочетании с циклоническим очагом в приполярной области он образует дипольную структуру, характерную для циркуляционных условий сухого и жаркого лета 1930-х гг. (рис. 3 в, г) и имеющую сходство с описанным ранее циркуляционным механизмом потепления Арктики в период ПСДВ (Grant et al., 2009). Анализ многолетнего хода ГКЗ (рис. 3 б), с максимумом в 2010 г., указывает на сходство с АМО (Hegerl et al., 2018), в частности с положительными фазами в 1930-1940-х и в 2000-х гг. В то же время, в поле аномалий атмосферного давления летом 2010 г., помимо описанной дипольной структуры, отчетливо проявляется возросшее влияние Тихого океана, которому ряд исследований отдают лидирующую роль в формировании условий этого климатического экстремума (Мохов, 2011; Попова, 2014), и это существенное отличие от засух 1930-х гг. Другое отличие засухи 2010 г. связано с отсутствием ощутимых последствий для крупномасштабного речного стока. Причина заключается в закономерном росте атмосферных осадков при современном потеплении климата (Второй оценочный доклад ..., 2014), особенно заметным в зимний период, который восполняет потери на испарение на фоне значительного роста летних температур (рис. 2 а, д) и серии засух в 1990-х гг. (Страшная и др., 2011).

### Выводы

Анализ изменений водности Волги и Северной Двины и климатических характеристик показывает, что на Восточно-Европейской равнине период потепления середины XX столетия проявился в многолетней засухе, 1934-1940 гг., которая, по классификации Палмера, не имеет аналогов в этом регионе по интенсивности и продолжительности и стала причиной экстремальных гидрологических событий. Помимо резкого сокращения годового стока Волги и Северной Двины, этот период отмечен абсолютным минимумом годового стока в бассейне Северной Двины и самым продолжительным за историю наблюдений маловодным периодом в бассейне Волги.

Наиболее близким, по интенсивности, продолжительности и влиянию на речной сток, подобием засухи 1930-х гг. можно считать засушливый период с конца 1960 до середины 1970-х гг., с максимумом летней температуры и интенсивности засухи в 1972 г. В спектре изменчивости годового стока Волги он отражается как второй по значимости максимум дисперсии, после абсолютного максимума в 1930-х гг. По циркуляционным условиям – сходству дипольной структуры аномалий атмосферного давления и связи с положительной фазой Атлантической мультideкадной осцилляции (т.е. с периодами повышения температуры поверхности Северной Атлантики), экстремальная жара и засуха 2010 г. может рассматриваться как аналог засух в период потепления середины XX в. В то же время имеется ряд существенных различий, связанных с особенностями современного летнего потепления. С одной стороны, это отсутствие ощутимых последствий для крупномасштабного речного стока, связанное с ростом осадков холодного периода, с другой – усиление влияния Тихого океана на формирование циркуляционных условий.

*Финансирование.* Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда №22-27-00495 «Климатические и циркуляционные факторы аномалий увлажнения крупных речных бассейнов Европейской России в эпоху потепления середины XX столетия».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бокучава Д.Д., Семенов В.А. 2018. Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. № 1. С. 28-51.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. 2014. С. 551-587.
- Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В. 2011. Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. № 345. С. 171-188.
- Мохов И.И. 2011. Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Известия РАН. Физика Атмосферы и океана*. Т. 47. № 6. С. 709-716.
- Попова В.В. 2014. Летнее потепление на Европейской территории России и экстремальная жара 2010 г. как проявление тенденций крупномасштабной атмосферной циркуляции в конце XX – начале XXI вв. //

Метеорология и гидрология. № 3. С. 37-49.

- Barry J.M. 1997. Rising tide: The great Mississippi flood of 1927 and how it changed America. New York. NY: Simon & Schuster. 528 p.
- Bokuchava D.D., Semenov V.A. 2021. Mechanisms of the Early 20th Century Warming in the Arctic // Earth-Science Reviews. No. 222. P. 103820.
- Brönnimann S., Stickler A., Griesser T., Ewen T., Grant A.N., Fischer A.M., Ross T. 2009. Exceptional atmospheric circulation during the “Dust Bowl” // Geophysical Research Letters. Vol. 36. No. 8. P. 1-6.
- Chylek P., Klett J.D., Dubey M.K., Hengartner N. 2016. The role of Atlantic Multi-decadal Oscillation in the global mean temperature variability // Climate Dynamics. Vol. 47. No. (9-10). P. 3271-3279.
- Cook B.L., Seager R., Miller R.L. 2011. Atmospheric circulation anomalies during two persistent North American droughts: 1932-1939 and 1948-1957 // Climate Dynamics. Vol. 36. No. (11-12). P. 2339-2355.
- Climatic Research Unit Dataset. 2022 [Электронный ресурс <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data> (дата обращения 09.06.2022)].
- ECMWF Dataset. 2022 [Электронный ресурс <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset> (дата обращения 09.06.2022)].
- GISS Surface Temperature Analysis. 2022 [Электронный ресурс <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (дата обращения 09.06.2022)].
- Grant A., Brönnimann S., Ewen T., Griesser T., Stickler A. 2009. The early twentieth century warm period in the European Arctic // Meteorologische Zeitschrift. Vol. 18. No. 4. P. 425-432.
- Hadley Centre Sea Level Pressure Dataset. 2022 [Электронный ресурс <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadslp2/> (дата обращения 09.06.2022)].
- Hegerl G.C., Brönnimann S., Schurer A., Cowan T. 2018. The early 20th century warming: Anomalies, causes, and consequences // WIREs Climate Change. No. 9. P. e522.
- Palmer W.C. 1965. Meteorological Drought. Technical Report // Weather Bureau Research Paper. No. 45, US Department of Commerce, Washington DC. 58 p.
- Schubert S.D., Suarez M.J., Pegion P.J., Koster R.D., Bacmeister J.T. 2004. Causes of long-term drought in the U.S. Great Plains // Journal of Climate. Vol. 17. No. 3. P. 485-503.
- Tokinaga H., Xie S.-P., Mukougawa H. 2017. Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability // Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 114. No. 24. P. 6227-6232.
- Wegmann M., Orsolini Y., Zolina O. 2018. Warm Arctic-cold Siberia: comparing the recent and the early 20th-century Arctic warmings // Environ. Res. Lett. No. 13. P. 025009
- Wegmann M., Rohrer M., Santolaria-Otín M., Lohmann G. 2020. Eurasian autumn snow link to winter North Atlantic Oscillation is strongest for Arctic warming periods // Earth System Dynamics. No. 11. P. 509-524.

## К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ

© 2023 г. А.Н. Салугин

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций  
и защитного лесоразведения РАН*

*Россия, 400062, г. Волгоград, Университетский просп., д. 97. E-mail: saluginan@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

Обсуждены математические методы описания процессов испарения с поверхности почв в условиях субаридной зоны юга России. Произведен анализ теоретических работ в этой области и результаты их практического приложения. Для объяснения натуральных наблюдений использовалось математическое моделирование. Математические модели испарения с поверхности почв разделяются на два типа: физико-математические, обоснованные взаимодействием воды с почвенным каркасом и феноменологические – на балансовых соотношениях. Анализ данных по испарению с поверхностей легких почв произведен с учётом диффузионного и пленочного перемещения влаги в поровом пространстве. При анализе кумулятивного испарения с протяженных территорий использовалась полуэмпирическая модель, связывающая интенсивность испарения с осадками и гидрофизическим состоянием почвенной влаги зоны аэрации. Получено хорошее согласие теории капиллярного передвижения с данными по испарению с поверхности открытых песчаных почв. Выявлена нелинейная связь скорости испарения от толщины подстилающей поверхности и капиллярно-сорбционным давлением. Количество годовых осадков на юге России и кумулятивное испарение связаны между собой степенной зависимостью, указывающей на капиллярно-сорбционную природу испарения.

*Ключевые слова:* испарение, пористость, зона аэрации, градиент давления, влажность, радиус капилляра, математическое моделирование, водный режим почв.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-12-19**

**EDN: DCKJSF**

Испарение в засушливых районах России играет существенную роль в формировании водного режима почв. Следует отметить, что закономерности испарения влаги из почвы изучены недостаточно, являясь актуальными в современной почвенной гидрологии (Черемисинов, 2014; Назари и др., 2020). На протяжении нескольких десятилетий эта проблема решалась в двух направлениях. Для метеорологии, где испарение исследуется как процесс, протекающий в приземном слое атмосферы по данным водного баланса. Детальный анализ работ в этой области приведен в работе А.Р. Константинова (1968). Другое направление принадлежит специалистам почвенной гидрологии, где законы испарения определяются физикой влагообмена в дисперсной среде при движении влаги от грунтовых вод к дневной поверхности (Чураев, 1963; Дерягин и др., 1964; Дмитриев, 1964; Нерпин, Чудновский, 1967, 1975; Van Genuchten, 1980; Schaap et al., 2001; Simunek et al., 2007; Панина, Шеин, 2014; Салугин, Кулик, 2017; Назари и др., 2020). Оба направления в одинаковой степени правомерны и дополняют друг друга при решении общей проблемы испарения. Вместе с тем, они имеют недостатки, связанные с практическим использованием в сельскохозяйственной практике. Имея это в виду, некоторые исследователи (Давыдов, 1947; Лыков, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979) на основе балансовых уравнений с учетом внутрипочвенного переноса исключили из рассмотрения трудно определяемые параметры и получили простые расчетные формулы, которые позволяют вычислять интенсивность испарения с поверхности почвы с достаточной точностью. В водном балансе испарение является одной из главных расходных статей. Сохранение влаги на территориях с её дефицитом является основой рационального использования водных ресурсов. В большинстве работ испарение рассматривалось как одна из статей водного баланса (Константинов, 1968; Лыков, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979; Будаговский, 1981; Шеин,

2005; Гельфан, 2007; Назари и др., 2020). При этом использовалось феноменологическое описание на основе законов балансовых соотношений. Основное внимание уделялось климатическим факторам (температура атмосферы, скорость ветра, влажность атмосферного воздуха, длительность и периодичность осадков и т.д.).

Второе направление (Аверьянов, 1949; Чураев, 1963; Дерягин и др., 1964; Дмитриев, 1964; Лыков, 1968) посвящено теории испарения из капилляров в квазистационарном приближении физики поверхностных процессов. Испарение моделировалось диффузией пара и потоком жидкости за счет градиента почвенного давления (пленочный перенос). Капиллярная модель (Нерпин, 1967, 1975) устанавливает связь между скоростью испарения, толщиной пленки, относительной влажностью воздуха над капилляром и его радиусом. Оказалось, что в мелких капиллярах ( $r < 10^{-6}$  м) испарение выше, чем в крупных ( $r > 10^{-4}$  м).

### Материалы и методы

В настоящей работе испарение изучается в модельном приближении без учета передвижения воздушных масс (ветра) над почвенным горизонтом. Процесс испарения из почвенной толщ рассматривался как изотермический с использованием теорий, приведенных в работах (Дерягин, 1964; Дмитриев, 1964; Нерпин, 1967). Авторы отмечают, что при одинаковой относительной влажности атмосферного воздуха ( $\varphi_0 < 1$ ) испарение протекает с поверхности капилляров по-разному в зависимости от их радиусов. Все капилляры были условно разбиты на два «сорта» – крупные ( $r_1 > 10^{-6}$  м) и тонкие ( $r_2 < 10^{-6}$  м). Для крупных количество испарившейся влаги за единицу времени (скорость испарения) определяется формулой:

$$I = \frac{Dp_sMF(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT(x - x_0)} \quad (1),$$

где  $T$  – температура атмосферного воздуха, К;  $F$  – суммарная площадь испарения, м<sup>2</sup>;  $D$  – коэффициент диффузии пара, м<sup>2</sup>/с;  $p_s$  – парциальное давление насыщенного пара, Па;  $M$  – масса грамм-молекулы воды, кг;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;  $\varphi_1$  – относительная влажность воздуха над мениском с радиусом  $r_1$ , отн. ед.;  $\varphi_0$  – относительная влажность атмосферного воздуха, отн. ед.;  $x_0$  – верхняя граница мениска (уровень дневной поверхности), м;  $x$  – опускание мениска капилляра при испарении, м. Относительная влажность воздуха над менисками отличается от атмосферной из-за поверхностного натяжения. Капилляры с большим радиусом введены для того, чтобы оценить влияние плёночной влаги. Авторами этой работы были выявлены три этапа испарения. На первом испарение быстро падает, стабилизируясь, переходя ко второму этапу с постоянной скоростью и большей длительностью по сравнению с первым. На третьем этапе испарение длится до тех пор, пока влажность образца не сравняется с максимальной гигроскопической (МГ). Из теоретических оценок С.В. Нерпина следует, что на практике испарение с легких почв на первом этапе можно рассчитывать по приближенной формуле:

$$I \approx I_0 \left(1 - \frac{nx}{x+x_0}\right) \quad (2),$$

где  $I$  – интенсивность испарения с поверхности мениска, г/ч·см<sup>2</sup>, расположенного на глубине  $x$  от дневной поверхности;  $n$  – доля поверхности, занятой мелкими капиллярами ( $r_1 < 10^{-6}$  м), отн. ед.;  $I_0$  – потенциально возможная интенсивность испарения (испаряемость), г/ч·см<sup>2</sup>. По формуле (2) интенсивность испарения с течением времени падает от  $I = I_0(x = 0)$  до  $I/I_0 = 1 - n = const$ . Установившаяся скорость зависит от соотношения  $n$  между числом крупных и тонких капилляров. С ростом  $n$  скорость испарения падает. В этой модели испарение можно связать с влажностью почвы, которая зависит от степени заполнения водой капиллярного пространства:

$$w = 1 - \frac{nx}{L} \quad (3),$$

где  $L$  – глубина зоны аэрации, м. Согласно (3), при  $x = L$ , когда капиллярное пространство свободно, потенциально возможная влажность равна  $1 - n = 1 - F_1/(F_1 + F_2)$ .  $F_1$  и  $F_2$  – площади испарения с поверхности мелких и крупных капилляров соответственно. При  $x = 0$  все капилляры заполнены водой и влажность максимальна ( $w = 1$ ). Величину  $n$  в практических приложениях можно связать с объёмом капиллярного пространства, которое в физике почв называется порозностью. В модели (Нерпин, Чудновский, 1975) количественное значение  $n$  содержит в себе информацию о гранулометрическом составе (ГС). После простых преобразований (2) с учетом (3) зависимость

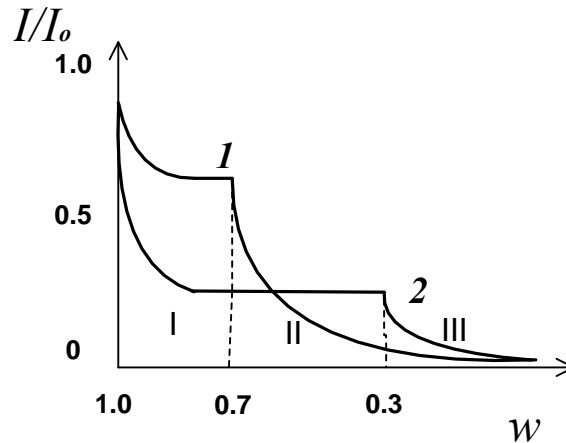


скорости испарения от влажности будет иметь следующий вид:

$$I \approx I_0 \left( 1 - \frac{n(L - wL)}{1 - wL + nx_0} \right) \quad (4).$$

Результаты математического моделирования при таких допущениях показаны на рисунке 1, из которого видно, что существует временной участок, где процесс испарения идет с постоянной скоростью.

Из графиков видно, что область испарения с постоянной скоростью возрастает с увеличением  $n$ . Испарение с дневной поверхности вначале обнажает верхние капилляры, и интенсивность испарения падает, пока не наступит уравновешенный обмен влагой между узкими и крупными капиллярами (Нерпин, Чудновский, 1975).



**Рис. 1.** Зависимость относительной интенсивности испарения от влажности, полученная из капиллярной модели (Нерпин, 1967). Условные обозначения: 1)  $n = 0.3$ ,  $L = 1$ ; 2)  $n = 0.7$ ,  $L = 1$ .

Приведённая капиллярная модель упрощена, т.к. не учитывает усадку почв при высыхании и хорошо «работает» для моделей испарения с лёгких почв. Теоретические графики, представленные на рисунке 1, качественно совпадают с наблюдениями, приведёнными в работе Н.В. Чураева (1963). Модель на таких приближениях позволила выявить фундаментальные положения в понимании механизма испарения из пористых сред. Была установлена зависимость парциального давления от уровня мениска капилляра. Это решает основную задачу почвенной гидрологии – насколько поднимется влага по капиллярной кайме при удалении из нее воды за счет испарения.

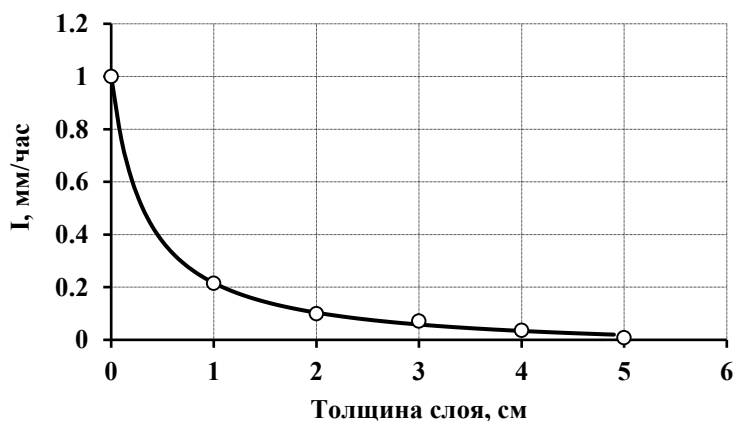
Другой аспект механизма испарения с открытой почвы связан с энергетическим состоянием внутрипочвенной влаги (Шейн, 2005; Grifoll et al., 2005; Bittelli et al., 2008). Некоторые авторы отмечали (Королев, Блудушкина, 2013), что интенсивность испарения зависит от гидрофизических свойств почв, их влажности ( $w$ ) и капиллярно-сорбционного давления ( $P_{к-с}$ ). Обнаруженная в их работе нелинейность между интенсивностью испарения и влажностью обнаруживает обратную связь: при уменьшении влажности за счёт испарения уменьшается скорость испарения. При этом интенсивность испарения  $I$  возрастает с увеличением дисперсности. Объясняя полученные результаты, авторы связывают интенсивность испарения с  $P_{к-с}$ . Экспериментально были выявлены интервалы влажности с одинаковой скоростью испарения. Оказалось, что независимо от гранулометрического состава каждому значению влажности соответствует некоторый диапазон скорости испарения. При этом наблюдается качественное согласие с капиллярной теорией С.В. Нерпина: интенсивность испарения вначале резко уменьшается для грубых фракций, в то время как у высокодисперсных имеется пологий временной участок. Кривые  $I(P)$  показывают, что переход ко второму этапу испарения происходит при НВ и испарение прекращается при МГ. Для давлений  $P_{к-с} > 0.0001$  Мпа испарение аппроксимируется степенной зависимостью  $I(P) = I_0 \cdot P^k$ , где  $I_0$  – интенсивность испарения при давлении 1.0 Мпа,  $k$  – безразмерный коэффициент. Интерпретация кривых  $I(P)$  была затруднена тем, что почвенная влага пребывает в разных энергетических состояниях, которые при испарении изменяются (Чудновский, 1975; Van Genuchten, 1980; Воронин,

1990; Simunek et al., 2007; Нерпин, Салугин, 2018). Переход от одного состояния к другому «размыт» и протекает в некотором диапазоне влажности. Исходя из этого, можно заключить, что полученную ими формулу  $I = I_0 \cdot P^k$  можно использовать для оценки скорости испарения с открытых почв. Физический смысл такой зависимости состоит в том, что энергетическое состояние влаги в почве определяет скорость испарения. Капиллярно-сорбционное давление определяется из кривых влагоудерживающей способности (ОГХ) в виде полуэмпирической зависимости почвенного потенциала от влажности (Van Genuchten, 1980), определяемой почвенным потенциалом из кривой ОГХ. Используя данные по влагоудержанию из кривых ОГХ можно предсказывать интенсивность испарения и, наоборот, определяя динамику испарения, следить за состоянием почвенной влаги.

### Результаты и обсуждение

Теоретические работы и экспериментальные факты использовались многими авторами для расчётов испарения в виде суммы транспирации и физического испарения без разделения этих составляющих, так как оба процесса протекают одновременно (Дмитриев, 1964; Константинов, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979; Будаговский, 1981). При известных атмосферных осадках и склонового стока автор (Кулик, 1979) достаточно точно определил долю физического испарения. Разработанный метод использовался автором на гидрологических площадях с импермацидным горизонтом. По наблюдениям в полевых условиях им была выявлена полуэмпирическая связь физического испарения с влажностью дневной поверхности. При влажности равной ПВ (полная влагоемкость) скорость испарения приближается к испаряемости (скорости испарения с водной поверхности). Летом такое увлажнение на юге России случается редко и реализуется лишь в течение нескольких часов после осадков. При образовании подсушенного слоя интенсивность испарения резко падает. Совершенно очевидно, что процесс испарения – отрыв молекул воды от почвенного каркаса энергетически связан, как отмечалось, со внутрпочвенным (капиллярным) давлением. Исходя из этого, мы обратились к нашим исследованиям по «восстановлению» ОГХ (Салугин, Кулик, 2017; Салугин и др., 2018) с целью их приложения к аппроксимации данных по испарению.

На рисунке 2 показаны теоретическая кривая (2) для аппроксимации данных по испарению, как функции толщины слоя сухого песка на поверхности плодородного слоя из данных работы Н.Ф. Кулика (1979).



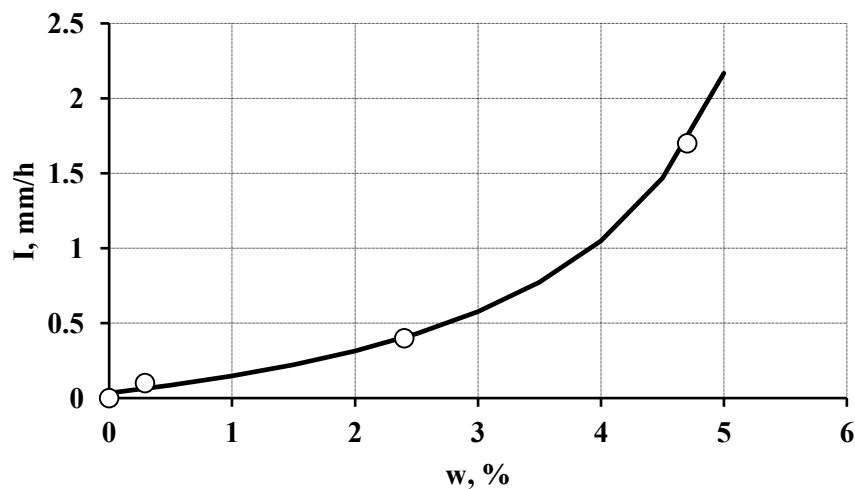
**Рис. 2.** Зависимость интенсивности испарения от толщины слоя сухого песка. Аппроксимация по формуле (2) с параметрами  $I_0 = 1$ ,  $n = 1.047$ ,  $x_0 = 0.336$ .

Из рисунка явствует хорошее совпадение наблюдений с теорией. Аппроксимация кривой осуществлялась методом обобщенной линейной регрессии пакета Matlab. Рисунок отражает хорошее согласие с капиллярной моделью С.В. Нерпина для случая испарения из почвы, покрытой сухим песком. Результат модели демонстрирует влияние мульчирующего слоя и может быть использован в агрономической практике. На открытой дневной поверхности сельскохозяйственного поля после коротких дождей ( $\approx 3$  мм) скорость испарения зависит от увлажнения почвенного горизонта и

скорость испарения снижается.

Таким образом, капиллярная модель в целом ряде случаев удовлетворительно описывает испарение почвенной влаги с учетом отмеченных ограничений. Это позволяет предположить, что полученные зависимости могут быть вполне применимы для практических расчетов и прогнозов испарения из легких почв, имеющих структуру близкую к модельной.

Характерной чертой физического испарения в летний период является его высокая интенсивность в первые сутки после выпадения осадков и резкое снижение в последующие дни. С точки зрения модели С.В. Нерпина, это соответствует первому этапу. В первые сутки испаряется поверхностный слой  $x_0$  с начальной интенсивностью  $I_0$ . Затем испарение падает (рис. 2) по закону  $\frac{I}{I_0} = 1 - n \cdot x / (x + x_0)$ , где  $x$  – толщина сухого слоя. Аппроксимация испарения в зависимости от толщины слоя сухого песка на дневной поверхности достаточно точно описывает наблюдения кривой (2) с параметрами:  $n = 1.047$  и  $x_0 = 0.336$  см. Значение  $n$  больше единицы, что не соответствует действительности, т.к.  $n = F_1 / (F_1 + F_2)$ , где  $F_1$  и  $F_2$  – площади тонких и толстых капилляров. Это может быть связано с извилистостью капилляров, для учета которой необходимо, ввести поправочный коэффициент, о чём указывает автор модели (Нерпин, 1975). К аналогичному эффекту приводит отступление менисков от нулевой отметки дневной поверхности ( $x_0$ ), что уменьшает потенциальную испаряемость ( $I_0$ ). Нелинейная зависимость скорости испарения от накануне выпавших осадков формально описывается формулой (4), подтверждая справедливость капиллярной природы испарения с дневной поверхности. На рисунке 3 показана аппроксимация наблюдений за испарением с открытых песков после выпадения осадков в первые часы. Видно, что формула (4) с параметрами  $I_0 = 0.1289$ ,  $n = 1.174$ ,  $x_0 = 5.619$ ,  $L = 1$  адекватно отражает динамику процесса в первые часы наблюдений после выпадения осадков.



**Рис. 3.** Интенсивности испарения как функция влажности почвы для открытых песков. Аппроксимация по формуле (4) с параметрами  $I_0 = 0.1289$ ,  $n = 1.174$ ,  $x_0 = 5.619$ ,  $L = 1$ .

Данные по испарению, приведённые в работе Н.Ф. Кулика (1979) были детально проанализированы нами с целью получения подходящей аналитической зависимости. Для этого осуществлялась регрессия данных на различные теоретические кривые нелинейным методом наименьших квадратов.

Как отмечалось выше, теоретические исследования испаряемости для почв весьма ограничены. В открытом пространстве при высокой влажности почвы интенсивность испарения описывается формулой:

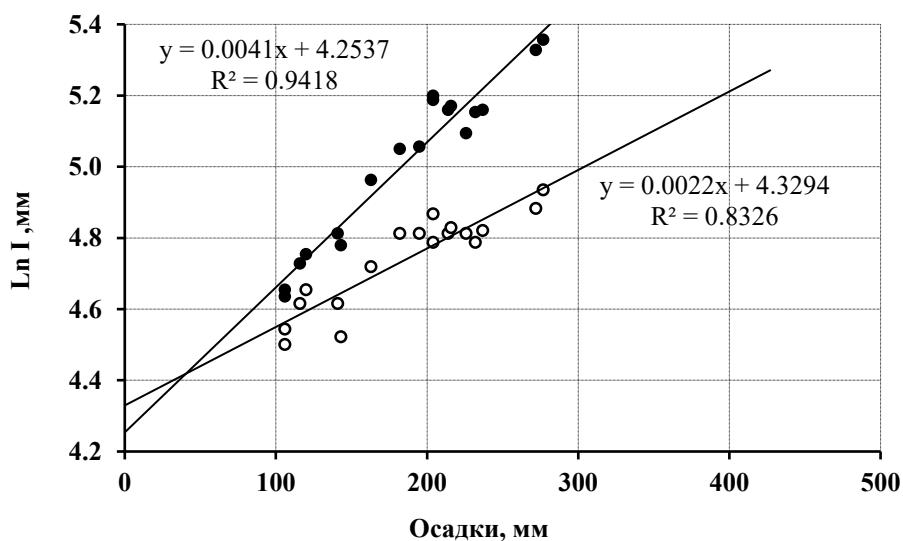
$$I = I_0(1 - e^{-at}) \quad (5),$$

которая является результатом дифференциальной модели:

$$\frac{dI}{dt} = \alpha(I_0 - I) \quad (6),$$

где  $I_0$  – потенциально возможная испаряемость,  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий интенсивность испарения. Модель (6) – феноменологическое описание процессов испарения обратной связью. Величина  $(I_0 - I)$  отражает отклонение текущей скорости испарения  $I$  от потенциально возможной, которая определяется упругостью насыщенных паров. Фактически это дефицит влажности. Чем больше дефицит, тем выше скорость испарения. Из многолетних данных было установлено, что суммарные осадки превышают физическое испарение.

Приведённые формулы были использованы для аппроксимации данных по испарению на песках южных регионов России. Расчет физического испарения по полуэмпирическим формулам за 22 года (1946-1967 гг.) данных восемнадцати метеостанций показал, что испарение возрастает при переходе к районам, где осадки выше. Вместе с тем, доля осадков расходуемых на испарение, возрастает при их уменьшении. Так, например, на Придонских песках на физическое испарение расходуется 110-120 мм, а на Астраханских – 75-90 мм, т.е. по 40-50% и 60-70% от суммы летних осадков соответственно. По многолетним данным (Давыдов, 1947; Константинов, 1968; Лыков, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979; Будаговский, 1981; Черемисинов, 2014), осадки, превышая физическое испарение, пополняют почвенный запас воды и увеличивают уровень грунтовых вод. На рисунке 4 представлены результаты аппроксимации данных по годовому физическому испарению (Кулик, 1979) в виде степенной функции от годовых осадков:  $I = I_0 w^k$ . Адекватность аппроксимации очевидна (рис. 4). Эти наблюдения согласуются с результатами работы В.А. Королева и Л.Б. Блудушкина (2013) и подтверждают капиллярную природу почвенного испарения. Отсюда можно заключить, что приведённая модель (5) адекватно описывает наблюдения за балансом влаги на поверхности агроландшафтов.



**Рис. 4.** Зависимость годового физического испарения от годовых атмосферных осадков в полулогарифмическом масштабе. Условные обозначения: чёрные точки – испарение с открытых песков, белые – под пологом леса; с их линейными уравнениями и коэффициентами детерминации. Аппроксимация функцией (5).

Нелинейность процессов перемещения влаги в дисперсных средах в виде степенной зависимости отмечалась многими авторами, как в теоретическом, так и экспериментальном аспектах. Полуэмпирическая модель Ван Генухтена (Van Genuchten, 1980; Schaap et al., 2001; Simunek et al., 2007; Салугин и др., 2017, 2018) связывает ОГХ с их влагопроводностью и способностью отдавать

влагу при испарении. Для влажностей в области ВЗ<sup>1</sup>-НВ ОГХ может быть представлена в виде степенной функции  $I = I_0 \cdot w^k$ , т.к. физическая обоснованность степенной интерпретации очевидна. Законченной теоретической модели испарения в виде аналитического выражения пока нет. Это определяется сложностью механизмов массопереноса в гетерогенных дисперсных средах, создающих энергетически разнообразные состояния внутрипочвенной влаги. Модель С.Ф. Аверьянова (1949) одна из немногих (7) с достаточной физической обоснованностью описывает влагопроницаемость в капиллярах почвенного каркаса. Модель привела автора к степенной зависимости влагопроводности почв  $K$  от влажности в ненасыщенных почвах:

$$K = K_{\phi} \left( \frac{w - w_r}{w_o - w_r} \right)^k \quad (7),$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации (влагопроводность при насыщении),  $w$  – наблюдаемая влажность,  $w_r$  – гигроскопическая влажность,  $w_o$  – влажность насыщения,  $n$  – показатель степени порядка 3.5.

Если говорить о природе и механизмах испарения в целом, то поставленная задача является сложной в теоретическом отношении (Константинов, 1968; Будаговский, 1981). Рассматривая общую теорию испарения, необходимо учитывать множество факторов стохастической природы (климат, неоднородность среды и т.д.). Кроме этого, существенную роль в постановке задачи играют так называемые краевые условия, напрямую связанные с испарением: осадки, ветер, растительный покров, температурный режим и т.д. В настоящей статье приведены результаты исследований по испарению с поверхности почв, которые имеют капиллярное строение зоны аэрации. Из приведенных результатов видно, что нелинейность испарения связана с капиллярной природой процесса. Совпадение теоретических положений С.В. Нерпина с наблюдениями свидетельствует об этом.

### Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что испарение с поверхности почв является процессом удаления влаги с учетом её энергетического внутрипочвенного состояния. В статье были рассмотрены различные по физической природе и степени детализации модели испарения с дневной поверхности. Капиллярная модель основана на способности удерживать влагу капиллярными силами, связана с гранулометрическим составом, определяющим поровое пространство почвы. Испарение в этой модели разбивается на три этапа и может быть использовано для оценки испарения с дневной поверхности легких почв. Балансовые сезонные модели испарения за длительные периоды и на больших территориях основаны на феноменологическом описании. Это интегрированный прием оценки годовых потерь влаги связанных с количеством выпавших осадков. Если процесс испарения в балансовых моделях рассматривать как усредненный по многолетним наблюдениям, то зависимость скорости испарения от влажности следует описывать степенным законом, что позволяет осуществлять прогнозы в динамических задачах водного баланса. Интенсивность испарения в полуэмпирических моделях определяется состоянием почвенной влаги: чем большим капиллярным давлением удерживается вода, тем ниже скорость испарения. Данные по гранулометрическому составу могут быть использованы для оценки испарения влаги с верхних слоев зоны аэрации. Методы математического моделирования при решении задач почвенной гидрологии, одной из которых является задача о сохранении влаги, весьма разнообразны, также как разнообразны цели этих задач. Приведенные в данной работе некоторые обобщения решения задач относятся только лишь к почвенному испарению без учета ветра и солнечной радиации. Получены, на наш взгляд, обнадеживающие результаты с физической интерпретацией наблюдений за испарением, указывают на необходимость более общего подхода к исследованию этого испарения.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122020100450-9 «Разработка новой методологии оптимального управления биоресурсами в агроландшафтах засушливой зоны РФ с использованием системно-динамического моделирования почвенно-гидрологических процессов, комплексной оценки влияния климатических изменений и антропогенных нагрузок на агробиологический потенциал и лесорастительные условия».

<sup>1</sup> ВЗ – влажность завядания, НВ – наименьшая влагоёмкость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверьянов С.Ф.* 1949. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания воздуха. // Доклад АН СССР. Т. 69. № 2. С.142-144.
- Будаговский А.И.* 1981. Испарение почвенных вод // Физика почвенных вод. М: Наука. С. 13-95.
- Воронин А.Д.* 1990. Энергетическая концепция физического состояния почв // Почвоведение. № 5. С. 7-19.
- Гельфан А.Н.* 2007. Динамико-стахостическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука. 279 с.
- Давыдов Л.К.* 1947. Водоносность рек СССР, ее влияния и влияние на нее физико-географических факторов // Гидрометиздат. Ленинград. 162 с.
- Дерягин Б.В., Нерпин С.В., Чураев Н.В.* 1964. К теории испарения жидкости из капилляров // Коллоидный журнал. Т. 26. № 3. С. 301-307.
- Дмитриев С.И.* 1964. Некоторые закономерности испарения влаги в порах почвы // Труды Ленинградского гидрометеорологического института. Вып 26. С.214-231.
- Константинов А.Р.* 1968. Испарение в природе. Л.: Гидрометеиздат. 590 с.
- Королев В.А., Блудушкина Л.Б.* 2013. Взаимосвязь потенциала влаги в грунтах с параметрами испарения из них влаги // Инженерная геология. № 3. С.22-33.
- Кулик Н.Ф.* 1979. Водный режим песков аридной зоны. Л.: Гидрометеиздат. 277 с.
- Назари М., Чанчи М.Р., Камель Х., Грисмер М., Садеги С.М.М.* 2020. Оценка методов расчёта месячных значений потенциального испарения в аридном климате // Аридные экосистемы. Т. 26. №4 (85). С. 84-92. [Nazari M., Chaichi M.R., Kamel H., Grismer M. & Sadeghi S.M.M. 2020. Evaluation of Estimation Methods for Monthly Reference Evapotranspiration in Arid Climates // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. P. 329-336.]
- Лебедев А.В.* 1976. Методы изучения баланса грунтовых вод. М.: Недра. 223 с.
- Лыков А.В.* 1968. Теория сушки. М.: Энергия. 472 с.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф.* 1967. Физика почв. М.: Наука. 584 с.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф.* 1975. Энерго- и массообмен в системе растение-почва-воздух. Ленинград: Гидрометеиздат. 358 с.
- Панина С.С., Шейн Е.В.* 2014. Математические модели влагопереноса в почве: значение экспериментального обеспечения и верхних граничных условий // Вестник Московского ун-та. Серия 17. Почвоведение. № 3. С. 45-50.
- Салугин А.Н., Кулик А.К.* 2017. Почв: моделирование восстановления водоудерживающей способности // Российская сельскохозяйственная наука. № 6. С. 51-55.
- Салугин А.Н., Кулик А.К., Власенко М.В.* 2017. Влагопроницаемость ненасыщенных почвогрунтов аридной зоны // Российская сельскохозяйственная наука. № 1. С. 21-24.
- Салугин А.Н., Кулик А.К., Власенко М.В.* 2018. Динамика элементов водного баланса в моделях почвенных гидрологических процессов // Российская сельскохозяйственная наука. № 3. С. 47-50.
- Черемисинов А.А.* 2014. Экологическая устойчивость орошаемой системы // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Т. 2. № 3-4 (8-4). С. 494-498.
- Чураев Н.В.* 1963. Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах // Доклады АН СССР. С. 1361-1364.
- Шейн Е.В.* 2005. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ. 432 с.
- Bittelli M., Ventura R, Gaylon S., Campbell G.S., Snyder R.L., Gallegati R, Pisa PR.* 2008. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils // Journal of Hydrology. P. 191-205.
- Griffoll J., Gasto J.M., Cohen Y.* 2005. Non-isothermal soil water transport and evaporation // Advances in Water Resources. Vol. 28. Iss. 11. P. 1254-1266.
- Schaap M.G., Leij F.J., Van Genuchten M.Th.* 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // Journal of Hydrology. Vol. 251. P. 163-176.
- Simunek J., Van Genuchten M. Th., M. Sejna.* 2007. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes // Vadose Zone Journal. Vol. 7. No. 2. P. 587-600.
- Van Genuchten, M.Th.* 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Science Society of America Journal. Vol. 44. Iss. 5. P. 892-898.

УДК 556.31; 631.432.1

## ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ГРУНТОВЫХ ВОД СКЛОНОВОГО АГРОЛАНДШАФТА

© 2023 г. А.С. Бузуева, Д.И. Губарев, М.Ю. Несветаев, В.А. Куликова

*Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока  
Россия, 410010, г. Саратов, ул. Тулайкова, д. 7. E-mail: deneg2@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

Целью исследований было установить влияние почвенно-климатических факторов на глубину залегания и степень засоления грунтовых вод склоново-ложбинного ландшафта. Материалом для исследований послужили данные наблюдений за 1990-2021 гг. гидрогеологического мониторинга 6 скважин на исследовательских стационарах ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока». Проведен анализ динамического изменения уровня грунтовых вод на различных элементах рельефа в скважинах, расположенных на Приволжской возвышенности в г. Саратове на Елшано-Гусельской равнине. В результате анализа установлена общая тенденция к повышению уровня грунтовых вод, как в условиях плакора, так и в условиях склоново-ложбинного рельефа. Установлен химический состав атмосферных осадков, как основного источника питания грунтовых вод. Наибольший процент от всего химического состава осадков принадлежит сульфатам – 35% и гидрокарбонатам – 22%. Выявлены основные ионы, определяющие химический тип и степень минерализации изучаемых вод. Превышение ПДК по средним значениям установлено по сульфатам, кальцию, магнию, натрию. Уровень минерализации воды на плакорах на 27% превышает показатели скважин ложбин. По среднемноголетним данным грунтовая вода, отобранная по элементам рельефа, характеризуется как соленая.

*Ключевые слова:* изменение климата, грунтовые воды, химический состав грунтовых вод.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-20-28**

**EDN: GBXGNB**

В настоящее время остро стоит проблема изменения уровня грунтовых вод и их химического состава (Кузьмина и др., 2019; Турусов, Крячкова, 2020). Наблюдается тенденция к засолению водоносных горизонтов, что негативно сказывается на экологической системе в целом. В грунтовых водах содержится большое количество различных химических элементов, формирование которых идет за счет атмосферных осадков, почвенных пород, рельефа, хозяйственной деятельности человека (Рабданов, Рабданов, 2018). Изучение всех факторов дает представление о динамике изменения уровня и химизма грунтовых вод, что позволяет использовать полученную информацию при прогнозировании почвообразовательных процессов и адаптации технологии возделывания сельскохозяйственных культур. Таким образом, целью исследований было установить влияние почвенно-климатических факторов на глубину залегания и степень засоления безнапорных грунтовых вод склоново-ложбинного ландшафта.

### Материал и методы

Скважины определения уровня безнапорных грунтовых вод и их химического состава расположены на Приволжской возвышенности в г. Саратове на Елшано-Гусельской равнине. Зона аэрации представлена черноземами южными с повышенным горизонтом карбонатных выделений и наличием гипсовых новообразований, развитыми на аллювиально-пролювиальных отложениях средне-верхнеплейстоценового звена на верхних частях склонов и на нижних частях склонов на делювиальных отложениях плейстоцена-голоцена. Материнская порода – темно-желтая делювиальная глина (Усов, 1948).

В статье использованы данные химического анализа грунтовой воды, полученные в результате ежеквартального отбора, проводимого с 1990 г. по настоящее время. Мониторинг проводится по сети скважин, глубиной до 30 м, расположенных в зоне транзита грунтовых вод. Химический анализ

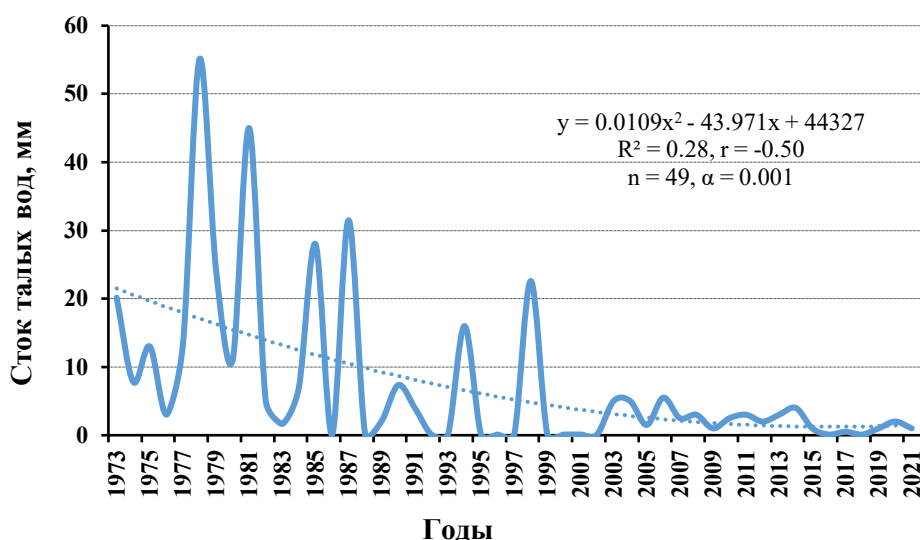


грунтовых вод проводился согласно методическим указаниям по определению катионно-анионного состава грунтовых и поливных вод. Показатели катионов и анионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) в пробах грунтовых вод и атмосферных осадков исследовали методом титрования. Содержание нитратов и показатель pH определяли с использованием иономера. Содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  определяли расчетным методом, сухой остаток термогравиметрическим методом. Показатели  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$  с помощью пламенной спектрофотометрии,  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  – фотометрическим методом. За эталонный показатель компонентов грунтовой воды приняты гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде (СанПиН ..., 2001).

Значительное влияние на глубину залегания и формирование катионно-анионного состава грунтовой воды оказывает расположение по элементам рельефа (Турусов, Крячкова, 2020). Для сравнения были выбраны две группы скважин, одна из которых расположена в нижней части склона, другая в его водораздельной части. Это связано с различной увлажненностью области питания элементов рельефа.

### Результаты и обсуждение

Основное питание грунтовых вод осуществляется за счет атмосферных осадков и поверхностного стока (Турусов, Крячкова, 2020). Химический состав выпадающих атмосферных осадков, почвенные и климатические особенности, а также взаимосвязь подземного и поверхностного потока в районе исследований определяют режим грунтовых вод (Новикова и др., 2011; рис. 1).



**Рис. 1.** Многолетнее (1973-2021 гг.) изменение стока талых вод изучаемого агроландшафта (по данным отдела экологии агроландшафтов ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Восток»).

Климатические изменения, произошедшие за последние 30 лет, привели к росту количества экстремально теплых зим и снижению глубины промерзания почвы, что вызывает перераспределение запасов влаги при таянии снега (Губарев и др., 2022). Ещё в 1994 году В.С. Ковалевским был сделан прогноз, что повышение температуры воздуха сделает зимы мягче, а уменьшение промерзания зоны аэрации приведет к увеличению питания подземных вод (Ковалевский, 1994).

Формирование химического состава грунтовых вод является следствием естественных геохимических процессов, а также использованием исследуемой территории в сельскохозяйственном производстве. В данном случае инфильтрация «чужеродных» веществ приводит к нарушению естественных процессов в системе «вода-почва», вследствие чего подземные воды меняют свой химический состав.

Основной катионно-анионный состав грунтовых вод сформировался в результате процессов выщелачивания отложений, обмена из глинистых пород, растворения солей, присутствующих в водовмещающих породах, а также в процессе окисления и растворения различных включений

(Злобина и др., 2017; Каюкова, Котова, 2017).

Грунтовые воды изучаемой области носят инфильтрационный характер, движение которых подвержено силам гравитации и осуществляется по направлению уклона рельефа. Достоверная корреляционная связь между приходом влаги с осадками и уровнем грунтовых вод по нашим данным более выражена в зимне-весенний период ( $r = -0.42 - -0.48$ ) на плакорном участке и нижней части склона соответственно.

При анализе показателей химического состава грунтовой воды, т.е. первого от поверхности водоносного горизонта можно сделать вывод, что воды исследуемых скважин на данной территории преимущественно сульфатно-кальциево-натриевые (табл. 1).

Характеристика химических показателей исследуемой территории по разным скважинам имеет одинаковую тенденцию к повышенному содержанию некоторых элементов. Наибольшее превышение значения относительно показателя ПДК приходится на сульфат-ион. За время исследований в среднем содержание сульфатов было выше в 4.4 раза на скважинах в нижней части склона и в 5.6 раз на скважинах плакора относительно значения ПДК. При этом в отдельные годы максимальные значения достигали показаний в 7466.8-8557.7 мг/л при ПДК = 500 мг/л. Присутствие в грунтовых водах такого значительного количества этого компонента обусловлено растворением таких минералов как гипс, а также переносом с осадками (Krouse, Mayer, 1999; Плюснин и др., 2008; Семенец и др., 2017). Суммарное количество сульфатов, приходящих на 1 га с осадками в зависимости от условий года, может варьировать от 10 до 25 кг, что составляет от 18 до 40% от общего количество минеральных веществ.

**Таблица 1.** Химический состав грунтовой воды исследуемых скважин за период с 1991 по 2021 гг.

Показатели грунтовой воды		Нижняя часть склона			Плакор			ПДК
		max	min	$\bar{x}$	max	min	$\bar{x}$	
pH		7.2	5.7	6.7	7.8	7.0	7.4	6.5-8.5
Ca <sup>2+</sup>	мг/л	1235.0	72.8	529.4	1000.0	178.0	568.0	180
Mg <sup>2+</sup>		407.0	21.6	131.4	402.0	56.7	213.8	40
Na <sup>+</sup>		1949.6	27.6	384.2	2850.1	147.1	626.0	200
K <sup>+</sup>		6.3	1.5	3.0	7.5	3.8	5.6	20
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		6.0	0.3	0.5	12.8	2.7	3.0	–
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		466.0	26.4	167.0	706.1	226.6	338.5	400
Cl <sup>-</sup>		131.5	32.7	86.5	112.7	59.5	97.1	350
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		7466.8	207.3	2204.9	8557.7	297.0	2825.1	500
NH <sub>4</sub> <sup>-</sup>		2.8	0.1	0.8	1.3	0.1	0.3	2.0
NO <sub>3</sub> <sup>+</sup>		23.6	5.7	14.9	34.4	5.0	16.1	45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.5	0.1	0.2	1.0	0.1	0.3	3.5
Сухой остаток		9360.0	472.3	3574.7	9600.0	1528.5	4766.2	1500

Ионы кальция в данных подземных водах также в среднем превышают допустимые концентрации. Значения в скважинах нижней части склона представлены в диапазоне от минимально зарегистрированных 72.8 мг/л до максимальных 1235.0 мг/л. Диапазон содержания Ca<sup>2+</sup> в скважинах плакора более узкий и находится в пределах от 178 до 1000 мг/л, при этом среднее значение показателя увеличивалось каждые 10 лет в 1.5 раза, а в нижней части склона изменения были более динамичные: с 2001 по 2010 г. в 2.8 раза относительно периода 1990-2000 гг., с 2011 по 2021 гг. – ещё в 1.9 раза. Отмеченная тенденция свидетельствует о более активном процессе выщелачивания Ca<sup>2+</sup> в нижней части склона.

Средние показатели магния (131.4-213.8 мг/л) превышают допустимые концентрации в 3.3 и 5.3 раза. При этом даже минимальные значения на плакорных скважинах не соответствуют

предельной норме. Расположение скважин по рельефу также отразилось на содержании данного иона. Концентрация  $Mg^{2+}$  на плакорных скважинах значительно превышала показания в скважинах нижней части склона, как по средним значениям (на 62.7%), так и по минимальным (на 162.5%). Стоит отметить, что так же, как и по  $Ca^{2+}$ , интенсивность поступления  $Mg^{2+}$  в грунтовые воды выше в нижней части склона.

Средние показатели содержания ионов натрия в скважинах нижней части склона превышают ПДК в 1.9 раза, при этом концентрация варьирует от 27.6 до 1949.6 мг/л. По скважинам на плакоре значения намного выше – 147.1-2850.1 мг/л, среднее содержание за весь период исследований составляет 626 мг/л при ПДК = 200 мг/л.

В целом химический состав грунтовых вод хорошо выражается количеством сухого остатка. Данный показатель на исследуемых скважинах значительно превышает допустимые нормы. Особенно показательны значения плакорных скважин, где даже минимально зарегистрированная отметка (1528.5 мг/л) выше ПДК. Максимумы доходят до отметки в 9360-9600 мг/л, при допуске до 1500 мг/л. Разница составляет 6.4 раза. Это объясняется повышенным содержанием отдельных ионов, входящих в состав сухого остатка, в основном за счет сульфатов.

В химическом составе грунтовых вод по обоим типам скважин было отмечено повышенное содержание гидрокарбонатов в отдельные годы до 466-706.1 мг/л, при среднем его содержании за мониторинговый период 167-338.5 мг/л (ПДК = 400 мг/л).

Содержание хлора по всем скважинам не превышает нормы. По плакорным скважинам среднее содержание иона составляет 97.1 мг/л, что немного выше, чем в скважинах нижней части склона (86.5 мг/л).

Соединения азота в наших исследованиях представлены нитратным и аммонийным ионами. Единичное превышение концентрации относительно ПДК отмечено только по аммонийному азоту в скважинах нижней части склона в незначительном количестве – 0.8 мг/л, что связано с глинистыми и тяжелосуглинистыми разновидностями чернозема южного, а также минимальным использованием азотных удобрений за изучаемый период. Средние показатели ионов азота не превышают десятых долей мг/л.

Следует отметить незначительное содержание фосфора и калия в условиях исследуемой территории вследствие низкой растворимости их соединений. За 30-летний цикл исследований не отмечено превышения допустимых концентраций, а также резких перепадов между значениями.

Анализируя показатели химического состава в грунтовой воде, важно отметить различия в исследуемых скважинах. Данные различия зависят главным образом от расположения по рельефу и уровня залегания вод, приуроченных к точкам наблюдения (Злобина и др., 2017). Показания химического состава скважин, находящихся на плакоре, превышают значения скважин, приуроченных к склоново-ложбинному рельефу. Это объясняется «разбавлением» грунтовой воды, движущейся в сторону зоны разгрузки (Губарева и др., 2015).

Основной приходной статьёй баланса пополнения грунтовых вод является объём выпавших атмосферных осадков, анализ длительного мониторинга которых выявил заметные колебания по годам. Минимальное количество отмечено в 2014 году – 334 мм, максимальное – 672 мм в 1990 г. (рис. 2). Среднемноголетнее значение количества выпадающих осадков составляет 492 мм.

В результате небольшого количества выпавших осадков в 1992, 1996, 1998, 2009, 2014 и 2020 гг. отмечается снижение УГВ по изучаемым скважинам. В период, когда количество осадков значительно превышало среднемноголетние показатели, отмечался пик поднятия УГВ – 1993-1994, 2000-2001, 2012-2013, 2017 гг.

Несмотря на волнообразные колебания УГВ, наблюдается математически значимый тренд к поднятию водоносного горизонта к поверхности почвы. Так, за первые 15 лет наблюдения (1990-2005 гг.) средний уровень залегания грунтовых вод составил по скважинам на плакоре 542 см, а по скважинам в нижней части склона – 391 см, за период с 2006 по 2021 гг. значения УГВ составили 422 и 271 см, поднявшись на 22 и 31% соответственно.

По всем скважинам максимальное поднятие воды отмечается в условиях 2019 года, где уровень составил 317 см по водораздельным скважинам и 171 см по скважинам нижней части склона, наиболее глубоко грунтовые воды находились в 1993 году (645 и 504 см).

За время наблюдения отмечены два наиболее резких скачка поднятия УГВ. Временные периоды

по обоим типам скважин были примерно одинаковыми, приуроченные к обильным выпадениям осадков. Первое очевидное повышение УГВ отмечается с 1996 по 2002 гг., что связано с наблюдаемыми в момент снеготаяния оттепелевыми процессами в 87% дней. Дальнейшее наблюдение не выявило резких колебаний, УГВ – варьировал в пределах 405-442.5 см, вплоть до следующего резкого скачка. В 2014 году отмечается небольшое снижение уровня воды, вызванное уменьшением суммы осадков на 60% относительно 2013 года, а с 2015 по 2019 гг. – его повышение до отметки 244 см (в среднем по скважинам) в 2019 году. Подъем уровня грунтовых вод 2015-2019 гг. составил 193 см.

Преобладание питания грунтовых вод над их разгрузкой определяет общую направленность к повышению УГВ (Злобина и др., 2017; Цуркан и др., 2017). Основным механизмом данного процесса, на наш взгляд, является отсутствие весеннего стока. Большая часть осадков весенне-зимнего периода, просачиваясь сквозь почву, пополняют водоносный горизонт (Barnett et al., 2005). Этот же процесс влияет и на повышение степени минерализации (Wang et al., 2012; Пироговская, Исаева, 2015; Каюкова, Котова, 2017).

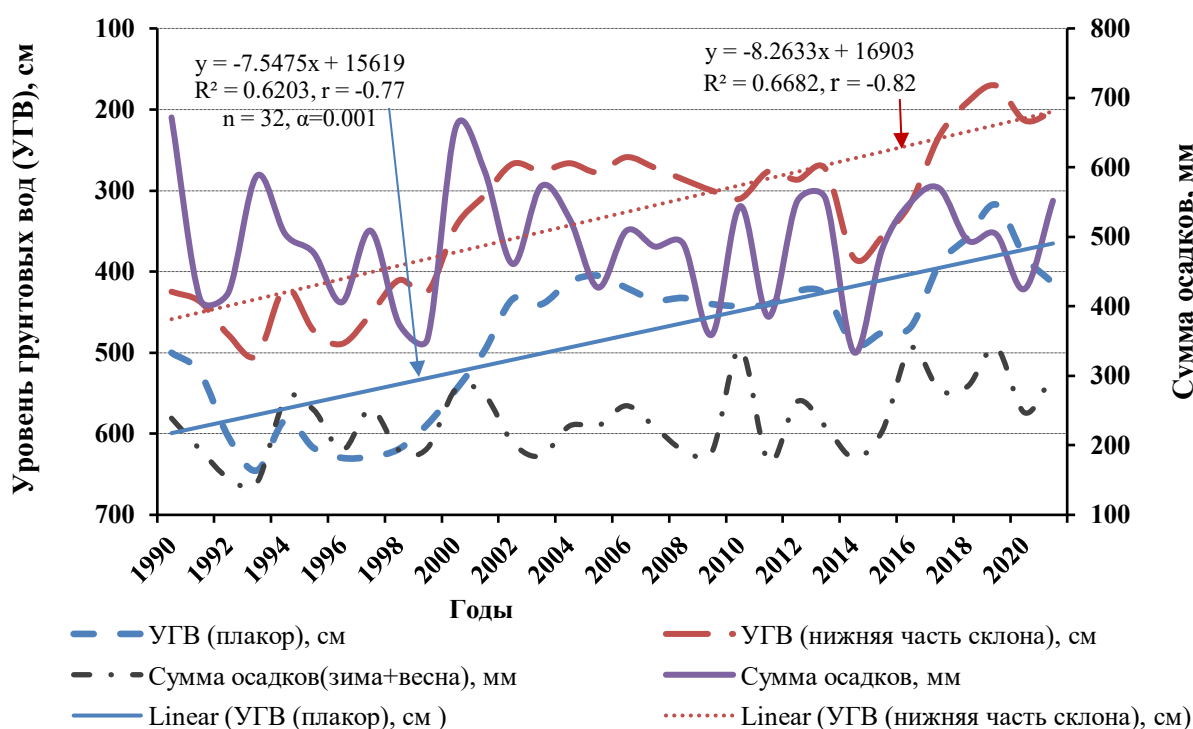


Рис. 2. Влияние атмосферных осадков на уровень грунтовых вод.

Формирование химического состава выпадающих осадков происходит за счет прохождения их через слои атмосферы, где происходит насыщение газами и пылевыми взвешьями (Еремина, 2019; Каюкова, Котова, 2017). Доказано, что чем больше почвы находятся в пахотном состоянии, т.е. без покрова растений, тем выше запыленность атмосферы и содержание химических элементов в воздушной среде и следственно в атмосферных осадках (Обзор состояния ..., 2021). Качественный состав выпадающих атмосферных осадков во многом определяет содержание химических элементов в грунтовой воде. Анализ атмосферных осадков проводился по 9 показателям в течение 30 лет (рис. 3).

Доминирующими по концентрации являются анионы сульфатов – 35% от общей минерализации. Сульфаты поступают в атмосферу в основном в результате сжигания различных видов топлива и могут переноситься на большие расстояния. Стоит отметить, что количество сульфатов, выпадающих с осадками, за последние 20 лет уменьшилось на 26%, а за последние 10 лет – на 58.5%, что, вероятно, связано с уменьшением доли промышленного производства, использующего в качестве

топлива уголь и мазут, где содержание серы может достигать нескольких процентов (Гришина, 2005). Также за аналогичный период количество калия и магния с осадками уменьшилось в 2 раза, а фосфора – в 3 раза. Среди катионов преобладают гидрокарбонаты – 22%. Также высокая концентрация ионов принадлежит кальцию и хлору (13 и 11%). Натрий, магний и калий находятся на одном уровне и составляют в общей сложности 16% общей минерализации. Наименьший процент принадлежит ионам фосфора и сумме ионов минеральных форм азота.

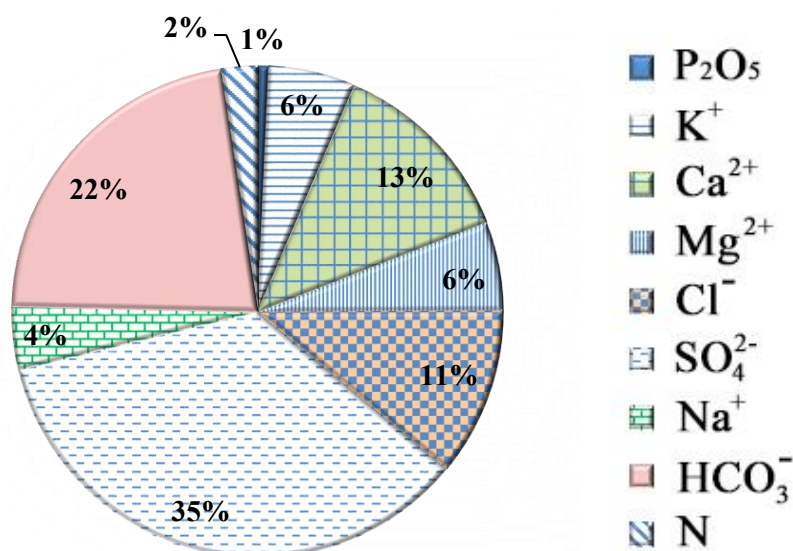


Рис. 3. Минерализация атмосферных осадков, % (средние значения за 1991-2021 гг.).

В условиях прохождения атмосферных осадков через зону аэрации происходит дополнительное обогащение растворенными почвенными солями и как следствие увеличение минерализации грунтовых вод (Каюкова, Котова, 2017).

Минерализация грунтовых вод – это сумма всех минеральных веществ (Takhteev et al., 2020). Показатели сухого остатка и минерализации имеют разные значения, так как используются разные методики определения. Определение сухого остатка заключается в выпаривании анализируемой воды, при котором происходит удаление летучих компонентов.

При анализе показателей химического состава грунтовой воды, т.е. первого от поверхности водоносного горизонта, можно сделать вывод, что воды исследуемых скважин на данной территории преимущественно сульфатно-кальциево-натриевые. Преобладание сульфатного типа характерно для территории с выпотным водным режимом, где отмечается концентрация солей вследствие высоких испарительных процессов при не глубоком УГВ. В разные периоды исследования отмечаются некоторые изменения химического типа воды. Так, на плакорных скважинах, в период 1990-1995 гг. содержание сульфатов начинает превосходить другие элементы, определяя тип грунтовых вод данной скважины. По скважинам нижней части склона в данный момент исследований не отмечается заметных скачков по содержанию элементов минерализации при доминировании сульфат-ион.

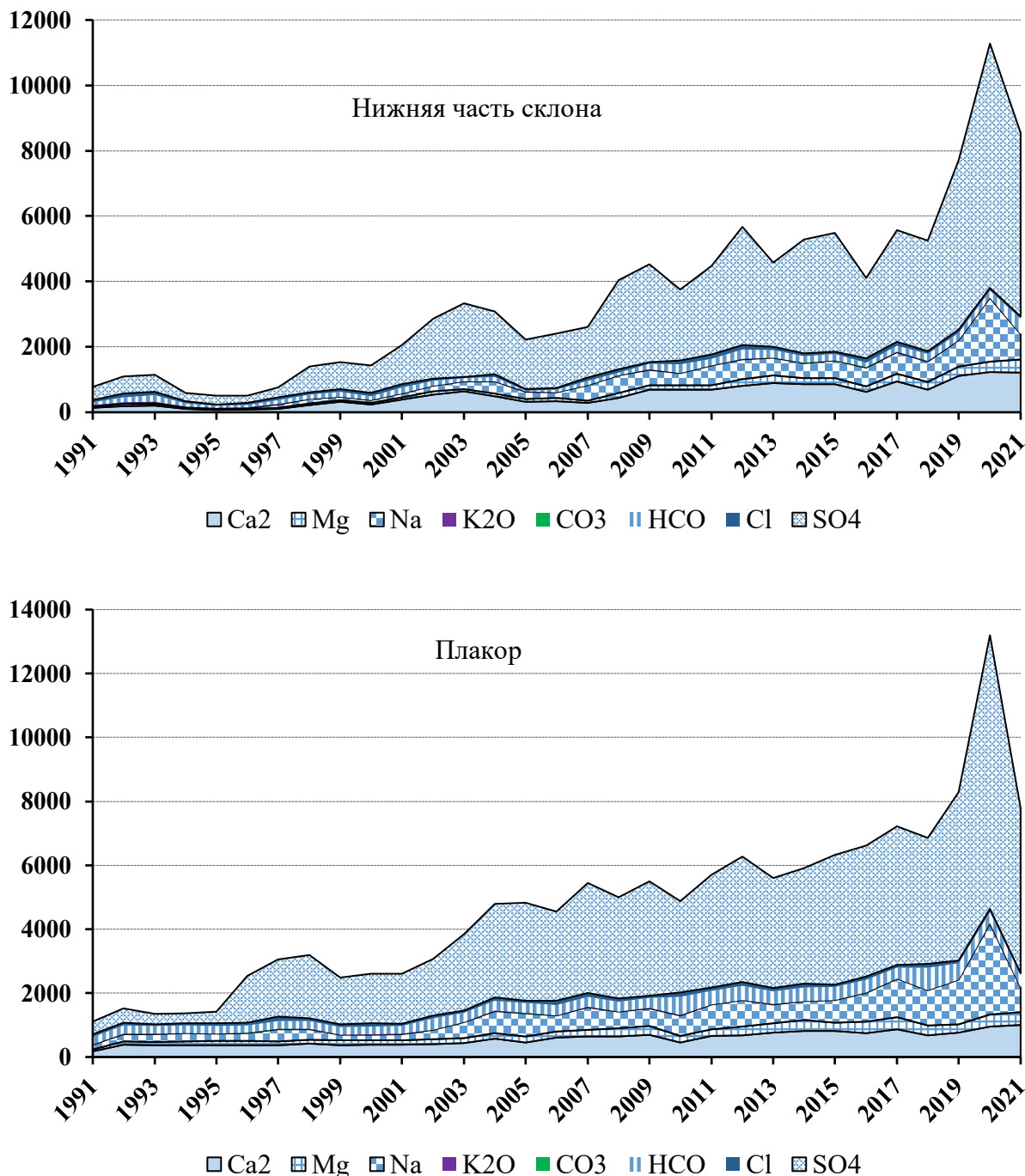
Дальнейшее наблюдение показывает волнообразное увеличение минерализации по обоим типам скважина, которое идет и сейчас за счет значительного повышения содержания сульфатов. Максимальные отметки минерализации и доминирующего иона  $SO_4^{2-}$  отмечены в условиях 2020 г. – на плакорных скважинах – 13199 и 8558 мг/л и скважинах нижней части склона – 11278 и 7467 мг/л. Также в этот период зарегистрированы максимумы кальция и натрия, которые также являются типобразующими ионами минерализации грунтовых вод данной территории.

При сравнении уровня минерализации воды исследуемых скважин видно, что значения плакорных скважин значительно превышают показатели скважин нижней части склона (рис. 4), в основном за счет различного расположения точек отбора природной воды по рельефу местности.

В среднем за период исследования разница между значениями составляет 27%.

Степень минерализации анализируемых скважин за 30-летний период варьирует от минимально зарегистрированных 1288 мг/л (скважины плакора) и 513 мг/л (скважины нижней части склона) до 13199 и 11278 мг/л на текущий момент времени.

Грунтовая вода на нижней части склона на момент начала исследований относилась к пресной категории (значение минерализации 500 мг/л), на плакоре – к солоноватым водам с концентрацией солей 1000-3000 мг/л. В настоящее время и по средним многолетним данным вода обоих типов скважин характеризуется как соленая (3000-10000 мг/л). Наивысшая отметка минерализации за время мониторинга достигает категории сильносоленых вод (более 10000 мг/л; по А.М. Овчинникову (1955)).



**Рис. 4.** Степень и состав минерализации грунтовой воды в исследуемых скважинах (нижняя часть склона и плакор) с 1991 по 2021 гг., мг/л.

Тенденция к увеличению минерализации грунтовых вод связана с тем, что температура зимнего периода стала значительно выше, осадки зачастую выпадают в виде дождей, увеличивая внутрисочвенный сток. При резком поднятии температуры в весенне-летний сезон, происходит усиление выпотного режима, что приводит к увеличению минерализации (Мусин и др., 2020; Новикова и др., 2011).

### Выводы

1. В результате исследований был определен основной катионно-анионный состав изучаемых грунтовых вод. Наибольшее превышение значения относительно фонового показателя ПДК приходится на сульфат-ион. За время исследований в среднем содержание сульфатов было выше в 4.4 раза по скважинам нижней части склона и 5.6 раз по плакорным скважинам относительно фонового значения. Выявлено, что практически по всем значениям содержание химических веществ на скважинах плакора превышает показатели скважин нижней части склона. По некоторым элементам превышение составляет почти 2 раза ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ), что объясняется расположением точек отбора по рельефу.

2. Основным источником пополнения грунтовых вод являются атмосферные осадки, что подтверждается совпадением повышения или понижения УГВ с количеством выпавших осадков, особенно в зимне-весенний период ( $r = -0.42 - -0.48$ ). Несмотря на волнообразные колебания УГВ, наблюдается общий математически значимый тренд поднятия водоносного горизонта к поверхности почвы (в среднем 4.8 см в год). Преобладающим элементом в минерализации осадков является сульфат-ион, значения которого достигают 35% от суммы всех составляющих. Этот же элемент доминирует и в минерализации грунтовых вод (60-63%). Вода исследуемых скважин преимущественно сульфатно-кальциево-натриевая. По степени минерализации (А.М. Овчинников, 1955) – соленая (3000-10000 мг/л), со средними значениями 4794 мг/л (плакорные скважины) и 3504 мг/л (скважины нижней части склона).

3. Изучение трансформации подземных вод позволит прогнозировать изменение физических и химических свойств черноземных почв, влияющих на уровень их плодородия.

*Финансирование.* Статья подготовлена в рамках темы Государственного задания № FNWF-2022-0007 «Формирование принципов управления экосистемами и сельскохозяйственным производством на основе цифровизации и прогнозирования почвенно-климатических изменений».

*Критерии авторства.* А.С. Бузуева проводила полевые обследования, анализировала полученные данные, писала рукопись. Д.И. Губарев проводил полевые обследования, наблюдения за грунтовыми водами, писал и оформлял рукопись. М.Ю. Несветаев проводил полевые обследования, собирал и анализировал данные. В.А. Куликова выполняла лабораторные исследования, анализировала полученные данные. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гришина Е.П. 2005. Основы химии окружающей среды. Часть 1. Химические процессы в атмосфере. Владимирский государственный университет. Владимир. 62 с.
- Губарев Д.И., Левицкая Н.Г., Деревягин С.С. 2022. Влияние изменений климата на деградацию почв в аридных зонах Поволжья // Аридные экосистемы. Т. 28. № 1 (90). С. 20-27. [Gubarev D.I., Levitskaya N.G., Derevyagin S.S. Influence of Climate Change on Soil Degradation in Arid Zones of the Volga Region // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 1. P. 15-21.].
- Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. 2015. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. № 3. С. 97-108.
- Еремينا И.Д. 2019. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестник Московского университета. Серия 5. География. №3. С. 3-9.
- Злобина В.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. 2017. Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. Москва: Мир науки. 191с.
- Каюкова Е.П., Котова И.К. 2017. Особенности формирования химического состава подземных вод зоны активного водообмена бассейна р. Бодрак (Юго-Западный Крым) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Т. 62. № 4. С. 343-356.
- Ковалевский В.С. 1994. Влияние изменений гидрогеологических условий на окружающую среду. М: Наука.



138 с.

- Кузьмина Ж.В., Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А.* 2019. Основные тенденции в динамике пойменных экосистем и ландшафтов низовьев Сырдарьи в современных изменяющихся условиях // Аридные экосистемы. Т. 25. № 4 (81). С. 16-29. [*Kuz'mina Zh.V., Shinkarenko S.S., Solodovnikov D.A.* 2019. Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions // *Arid Ecosystems*. Vol. 9. No. 4. P. 226-236.].
- Мусин Р.Х., Галиева А.Р., Кудбанов Т.Г.* 2020. Характер и степень трансформации гидрогеоэкологических условий на одной из современных промплощадок в Татарстане // Геоэкология. № 2. С. 48-52.
- Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Шаповалова И.Б., Вышивкин А.А.* 2011. Ответные реакции экосистем на изменение водного режима территории в степной зоне // Аридные экосистемы. Т. 17. № 3 (48). С. 38-48. [*Novikova N.M., Volkova N.A., Ulanova S.S., Shapovalova I.B., Vyshivkin A.A.* 2011. Ecosystem responses to hydrological regime changes in the steppe zone // *Arid Ecosystems*. Vol. 1. No. 3. P. 142-148.].
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. 2021. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 205 с.
- Овчинников А.М.* 1955. Общая гидрогеология. Москва: Госгеолтехиздат. 385 с.
- Пироговская Г.В., Исаева О.И.* 2015. Поступление макро- и микроэлементов с атмосферными осадками и их потери при вымывании из дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава // Почвоведение и агрохимия. № 2 (55). С. 76-86.
- Плюснин А.М., Кислицина Л.Б., Жамбалова Д.И., Перязева Е.Г., Удодов Ю.Н.* 2008. Особенности формирования химического состава грунтовых вод в дельте реки Селенга // Геохимия. № 3. С. 323-330.
- Рабданов Г.Г., Рабданов Р.Г.* 2018. Влияние уровня залегания грунтовых вод на основные показатели плодородия светло-каштановых почв // Агрохимия. № 4. С. 27-35.
- СанПиН 2.1.4.1074-01. 2001. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: Санитарные правила и нормы. М.: Информационно-издательский центр Госкомэпиднадзора России. 59 с.
- Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С.* 2017. Химический состав атмосферных осадков российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Т. 328. № 3. С. 27-36.
- Турусов В.И., Крячкова М.П.* 2020. Динамика изменения уровня грунтовых вод за период с 2010 по 2014 год на полигоне каменная степь // Успехи современного естествознания. № 7. С. 157-161.
- Усов Н.И.* 1948. Почвы Саратовской области. Правобережье – Саратов. Огиз. 288 с.
- Цуркан С.Я., Самойлов А.Г., Зозырев Н.Ю., Токарский А.О., Татару В.М.* 2017. Результаты режимных наблюдений за подземными водами Саратовской области в 2010-2014 гг. // Недр Поволжья и Прикаспия. № 90. С. 59-69.
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P.* 2005. Potential Impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // *Nature*. Vol. 438. P.303-309.
- Krouse H.R., Mayer B.* 1999. Sulfur and oxygen isotopes in sulphate // *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* / Eds. P.G. Cook, A.L. Herczeg. Kluwer; Boston. P. 195-231.
- Takhteev V.V., Erolova O.G., Lopatovskaya E.R., Khadeeva I.O.* 2020. Water chemistry in small tributaries and the coastal zone of lake Baikal in the period of environmental crisis // *Water Resources*. Vol. 47. No. 3. P. 448-458.
- Wang S., Song X., Wang Q., Xiao G., Wang Z., Liu X., Wang P.* 2012. Shallow groundwater dynamics and origin of salinity at two sites in salinated and water-deficient region of North China Plain, China // *Environmental Earth Sciences*. Vol. 66 (3). P. 729-739.

**СЕЗОННАЯ И ГОДОВАЯ ДИНАМИКА ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
В ВОСТОЧНОЙ ПРИРОДНО-СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЗОНЕ  
РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ В 1961-2020 ГГ.**

© 2023 г. В.Н. Гудко, А.В. Усатов, К.В. Азарин

*Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета  
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 194/1. E-mail: Gudko.1985@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

На основании данных метеорологической станции Ремонтное, расположенной в Восточной природно-сельскохозяйственной зоне Ростовской области, за период 1961-2020 гг. оценивается сезонная и годовая динамика средней температуры, количества осадков, а также динамика гидротермических условий, выраженных индексом аридности де Мартона. В период исследования отмечен значимый тренд увеличения среднегодовой температуры и тенденция роста годового количества осадков. Значимый тренд увеличения среднесезонной температуры отмечен для всех сезонов, за исключением осеннего, когда наблюдалась положительная тенденция. Тенденция снижения количества осадков отмечена в летний сезон. В остальные сезоны тенденции осадков положительны. Годовой режим гидротермических условий в 75% случаев характеризовался как умеренно и слегка засушливый. Умеренно засушливые условия также доминировали в весенний (43% случаев), летний (55% случаев) и осенний (47% случаев) сезоны. Сезонные изменения температурного режима и количества осадков в исследуемый период привели к смещению характера гидротермических условий. В зимний и летний сезоны отмечена тенденция смещения режима гидротермических условий к более засушливому, а в весенний и осенний сезоны, напротив, к более влажному. В годовом интервале на фоне увеличения количества осадков отмечено смещение режима гидротермических условий к более влажному. Таким образом, на основании рассчитанных годовых тенденций можно заключить, что для метеостанции Ремонтное в период 1961-2020 гг. характерно гумидное потепление.

*Ключевые слова:* температура воздуха, количество осадков, гидротермические условия, индекс аридности де Мартона, Ростовская область, гумидное потепление.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-29-35**

**EDN: OSFPEN**

Гидротермические условия, определяемые как соотношение тепла и влаги, являются значимым фактором природной среды, определяющим состояние и развитие наземных экосистем. Восточная природно-сельскохозяйственная зона (ПСЗ) Ростовской области включает пять административных районов (Дубовский, Заветинский, Зимовниковский, Орловский и Ремонтненский) и характеризуется как зона с наиболее неблагоприятными, с точки зрения режима увлажнения, гидротермическими условиями в регионе. При этом крайние восточные районы зоны, Заветинский и Ремонтненский, оцениваются как среднеаридные, а остальные районы – как умеренно аридные (Абдуллаева, Безуглова, 2016). Однако для метеорологической станции Ремонтное, расположенной в Восточной ПСЗ, мы также отметили тенденцию к смещению режима гидротермических условий к более влажному (Гудко и др., 2021). Тем не менее, исследования показывают, что территории Восточной ПСЗ в последние десятилетия наиболее подвержены деградационным процессам, и в условиях дальнейшего интенсивного роста температур и снижения увлажнения угроза опустынивания здесь достаточно высока (Безуглова и др., 2020). Ввиду этого всесторонняя оценка изменений гидротермических условий в Восточной ПСЗ крайне важна. Поэтому в настоящем исследовании, на основании данных метеорологической станции Ремонтное, оцениваются сезонная и годовая динамика температурного режима, режима выпадения осадков, а также динамика гидротермических условий, что также дополнит представление о климатических изменениях в Восточной ПСЗ Ростовской области.

### Объекты и методы исследования

В исследовании использованы наборы суточных климатических данных средней температуры воздуха и количества осадков по метеорологической станции Ремонтное за период 1961-2020 гг., полученные из Всемирного центра данных Российского исследовательского института гидрометеорологической информации (Булыгина и др., 2022). Для оценки сезонных климатических изменений для каждого года периода исследования были рассчитаны средние значения температур и сумм осадков в зимний (декабрь предыдущего года – февраль), весенний (март-май), летний (июнь-август) и осенний (сентябрь-ноябрь) сезоны. Гидротермические условия (сочетание тепла и влаги) для каждого сезона оценивались количественным методом. Отметим, что выбор оптимального количественного метода для оценки гидротермических условий неоднозначен, т.к. в зависимости от используемого показателя конечный результат при прочих равных условиях может различаться (Шумова, 2021). В исследованиях в качестве количественной оценки гидротермических условий наиболее часто используют гидротермический коэффициент Селянинова. Однако он не позволяет оценить гидротермические условия каждого сезона, т.к. при его расчете учитывается период со среднесуточными температурами воздуха выше 10°C. Поэтому в настоящем исследовании для оценки гидротермических условий мы использовали общепринятый количественный показатель индекс аридности де Мартона ( $I_{DM}$ ; De Martonne, 1926). Использование данного показателя позволяет оценить гидротермические условия как за годовой, так и за сезонный интервал, и, аналогично гидротермическому коэффициенту Селянинова, при его расчете достаточно располагать информацией о температуре воздуха и осадках (Vlăduț, Licurici, 2020). Индекс  $I_{DM}$  за годовой период определяется по соотношению:

$$I_{DM} = \frac{P}{T+10} \quad (1),$$

где  $I_{DM}$  – индекс аридности де Мартона,  $P$  – годовая сумма осадков в мм,  $T$  – среднегодовая температура воздуха в °C. Индекс  $I_{DM}$  за сезон определяется по соотношению (Andrade, Corte-Real, 2016):

$$I_{DM} = \frac{4 \cdot P_s}{T_s+10} \quad (2),$$

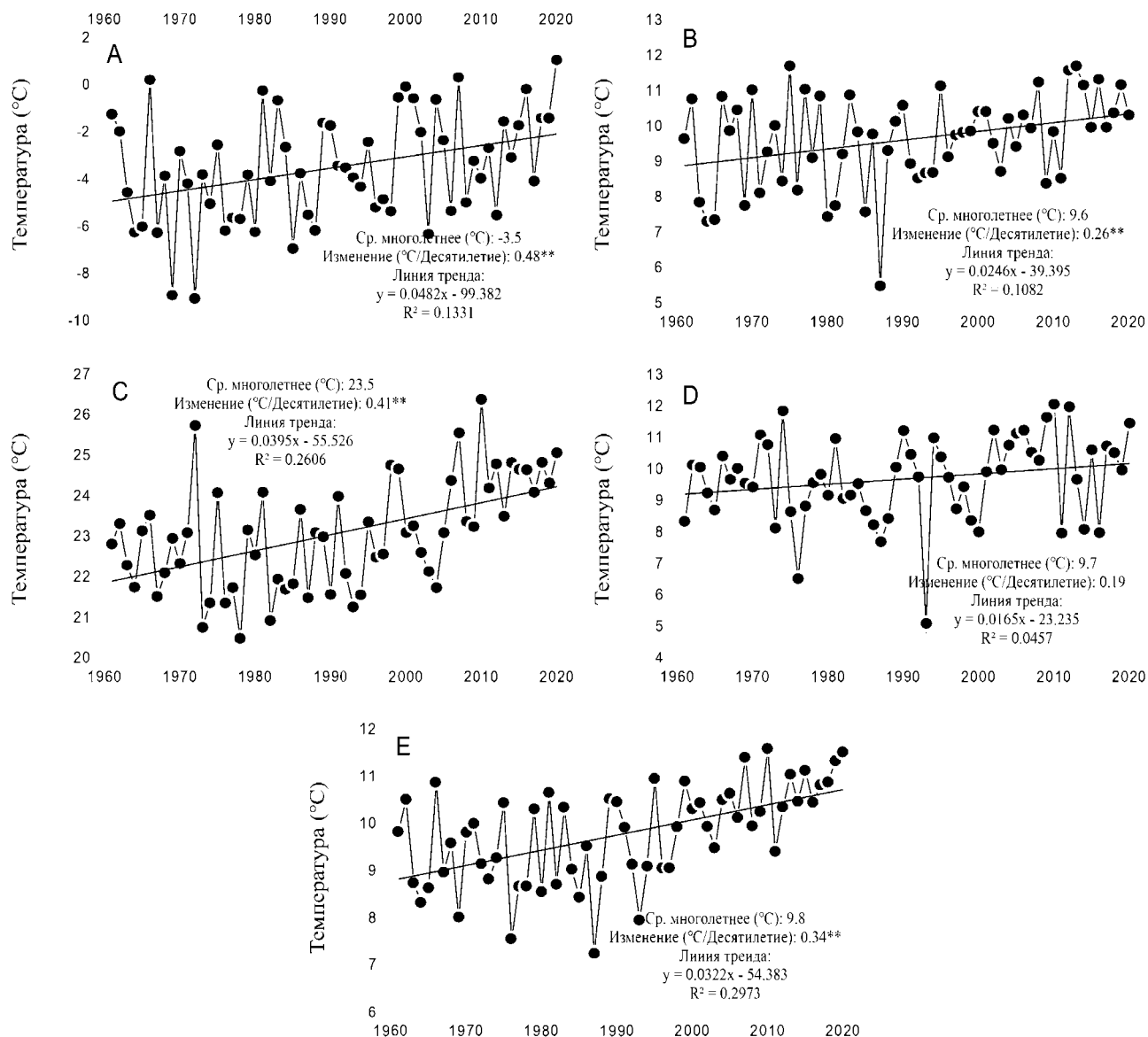
где  $P_s$  – количество осадков за сезон в мм,  $T_s$  – средняя температура сезона в °C. Для годовых и сезонных значений температуры, осадков и индекса  $I_{DM}$  в 1961-2020 гг. были также проанализированы временные тенденции. Анализ тенденций проводили с помощью непараметрического критерия Манна-Кенделла при статистическом уровне значимости 95% ( $\alpha < 0.05$ ; Mann, 1965). Величину изменения во временном ряду определяли с помощью критерия наклона Сена. Анализ тенденций также позволит определить сезоны, климатические изменения в которых наиболее выражены.

### Результаты и обсуждение

*Среднесезонная и среднегодовая температура воздуха.* В период 1961-2020 гг. отмечен значимый тренд увеличения среднегодовой температуры со скоростью роста 0.34°C/десятилетие (рис. 1 Е). Значимый тренд увеличения средней температуры воздуха отмечался для зимнего, весеннего и летнего сезонов со скоростью роста 0.48, 0.26 и 0.41°C/десятилетие соответственно (рис. 1 А-С). Средняя температура осенью имела незначимую тенденцию увеличения со скоростью роста 0.19°C/десятилетие. Таким образом, наиболее интенсивный рост средней температуры в 1961-2020 гг. отмечен в зимний сезон.

В период исследования среднесезонное значение температуры в зимний сезон составило -3.5°C при диапазоне изменения в пределах от -9.1 до +1.0°C (среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 2.3^\circ\text{C}$ ). Среднесезонное значение в весенний сезон составило 9.6°C при диапазоне изменения в пределах от 5.5 до 11.7°C (среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 1.3^\circ\text{C}$ ); в летний сезон составило 23.5°C при диапазоне от 20.5 до 26.4°C ( $\sigma = 1.4^\circ\text{C}$ ); в осенний сезон составило 9.7 °C при диапазоне от 5.1 до 12.1°C ( $\sigma = 1.4^\circ\text{C}$ ). Среднесезонное значение среднегодовой температуры составило 9.8°C при диапазоне изменения в пределах от 7.2 до 11.6°C ( $\sigma = 1.0^\circ\text{C}$ ). Примечательно, что максимальные значения средней температуры наблюдались в период 2010-2020 гг. Например, максимальное значение среднегодовой температуры, как и средней температуры в летний и осенний

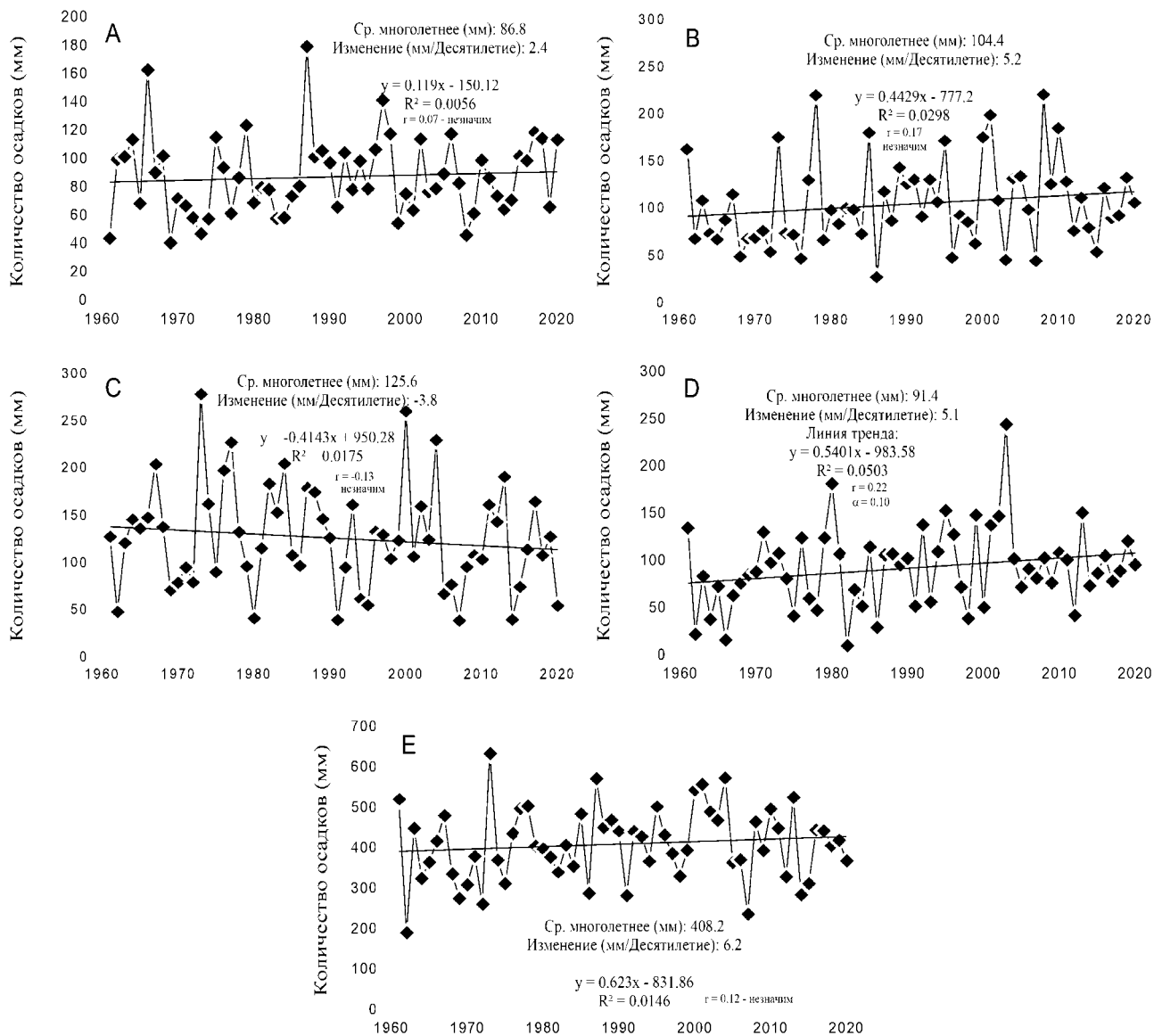
сезон, наблюдались в 2010 г. и составили 11.6, 26.4 и 12.1°C соответственно (рис. 1 С-Е). При этом минимальные значения температур отмечались преимущественно до 2000 года.



**Рис. 1.** Сезонная и годовая динамика средней температуры по метеорологической станции Ремонтное в 1961-2020 гг. *Условные обозначения:* А – зима (декабрь-февраль), В – весна (март-апрель), С – лето (июнь-август), D – осень (сентябрь-ноябрь), E – годовые значения, \*\* – отмечены изменения при статистическом уровне значимости  $\alpha = 0.01$ .

*Сезонное и годовое количество осадков.* В период 1961-2020 гг. каких-либо значимых изменений в количестве осадков по всем сезонам не отмечено, за исключением осени, когда наблюдался небольшой достоверный тренд повышения выпадения осадков со значимым коэффициентом корреляции ( $r = 0.22$ ,  $\alpha = 0.10$ ). Поэтому в годовом интервале отмечена незначимая тенденция увеличения количества осадков со скоростью роста 6.2 мм/десятилетие (рис. 2 Е). При этом годовое количество осадков варьировало в пределах от 189.5 до 632.4 мм ( $\sigma = 90.1$  мм), а среднемноголетнее значение составило 408.2 мм. Сезонная динамика числа осадков в 1961-2020 гг. была разнонаправлена. Так, в летний сезон отмечена тенденция снижения осадков на -3.8 мм/десятилетие (рис. 2 С). Осадки в зимний сезон росли на 2.4 мм/десятилетие (рис. 2 А), а рост осадков в весенний и осенний сезоны наиболее выражен и составил 5.2 и 5.1 мм/десятилетие соответственно

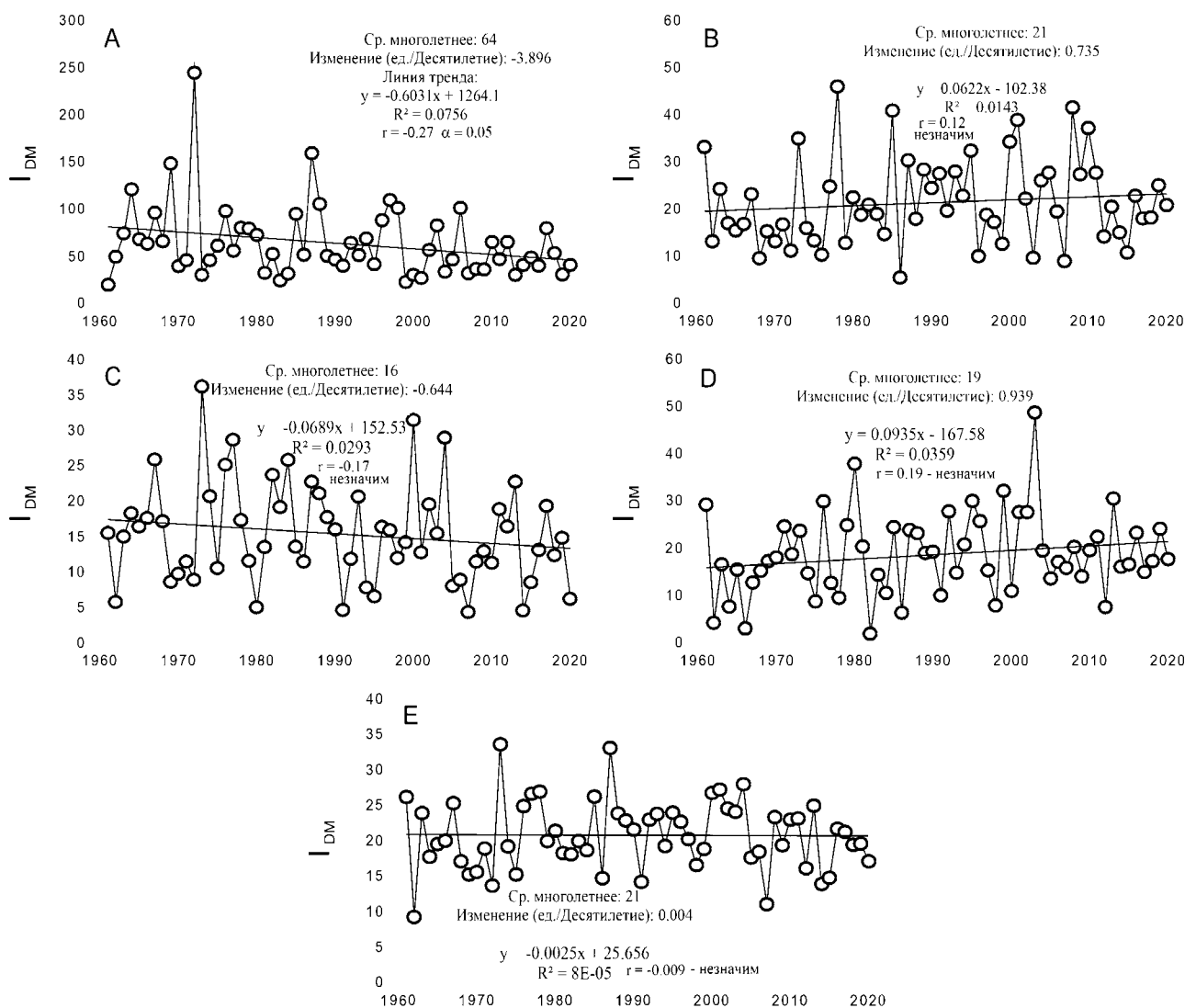
(рис. 2 В, D). Наибольшее среднееголетнее количество осадков в 125.6 мм наблюдалось в летний сезон, что составляет около 31% от общего числа осадков за год. При этом размах значений в этот период варьировал от 38.5 до 278.1 мм ( $\sigma = 54.7$  мм). Наименьшее среднееголетнее число осадков в 86.8 мм (21% от общего числа осадков за год) отмечено в зимний сезон, и их количество колебалось в пределах от 40 до 178.8 мм ( $\sigma = 27.2$  мм). Среднееголетнее количество осадков в весенний сезон составило 104.4 мм при диапазоне изменения в пределах от 26.6 до 220.1 мм ( $\sigma = 54.7$  мм), а в осенний сезон – 91.4 мм при диапазоне изменения в пределах от 9.0 до 243.3 мм ( $\sigma = 42.1$  мм). За период исследования минимальное сезонное количество осадков в 9 мм наблюдалось осенью в 1982 г., а максимальное – в 278.1 мм весной в 1973 г.



**Рис. 2** Сезонная и годовая динамика количества осадков по метеорологической станции Ремонтное в 1961-2020 гг. Условные обозначения: А – зима (декабрь-февраль), В – весна (март-апрель), С – лето (июнь-август), D – осень (сентябрь-ноябрь), E – годовые значения.

*Сезонная и годовая динамика индекса аридности де Мартона.* Сезонная динамика индекса  $I_{DM}$  в период 1961-2020 гг. имела разнонаправленный характер (рис. 3). При этом наиболее заметное изменение гидротермических условий отмечено в зимний сезон, а величина индекса  $I_{DM}$  в этот период снижалась со скоростью  $-3.896$  ед./десятилетие (рис. 3 А). Аналогичная негативная динамика

наблюдалась также в летний сезон, когда величина индекса  $I_{DM}$  снижалась на  $-0.644$  ед./десятилетие (рис. 3 С). Полученные тенденции свидетельствуют о смещении гидротермических условий в зимний и летний сезон к более засушливым. Для весеннего и осеннего сезонов, напротив, отмечена тенденция увеличения индекса  $I_{DM}$ , а скорость изменения составила  $0.735$  и  $0.939$  ед./десятилетие соответственно, что говорит о смещении режима гидротермических условий к более влажному (рис. 3 В, D). Примечательно, что на фоне разнонаправленной сезонной динамики тест Манна-Кендалла индекса  $I_{DM}$  на годовом интервале, тем не менее, показал наличие положительной тенденции (рис. 3 Е). При этом скорость изменения индекса  $I_{DM}$  в данный период невелика и составила всего  $0.004$  ед./десятилетие, что в целом также свидетельствует о гумидном потеплении в период 1961-2020 гг. и медленном смещении режима гидротермических условий к более влажному.



**Рис. 3** Сезонная и годовая динамика индекса аридности де Мартона ( $I_{DM}$ ) по метеорологической станции Ремонтное в 1961-2020 гг. *Условные обозначения:* А – зима (декабрь-февраль), В – весна (март-апрель), С – лето (июнь-август), D – осень (сентябрь-ноябрь), Е – годовые значения.

Такой результат согласуется с результатами проведенного ранее исследования, в котором по метеорологической станции Ремонтное нами была также показана тенденция увеличения гидротермического коэффициента Селянинова, что также свидетельствует о гумидном потеплении (Гудко и др., 2021). Примечательно, что исследования по оценке изменений гидротермических условий в республике Калмыкия, которая непосредственно граничит с Восточной ПСЗ Ростовской

области, также показали наличие тенденций к гумидному потеплению в 1966-2017 гг. (Шумова, 2020, 2021).

В целом, согласно общепринятой классификации индекса аридности де Мартона ( $I_{DM}$ ) (Andrade, Corte-Real, 2016; Vlăduț, Licurici, 2020), межгодовой характер гидротермических условий метеорологической станции Ремонтное в 1961-2020 гг. в большинстве (75% случаев) характеризовался как умеренно и слегка засушливый (табл.). В остальных 25% случаев отмечались умеренно влажные и влажные условия. Межгодовое значение индекса  $I_{DM}$  варьировало в пределах от 9 (полузасушливый) и до 34 (влажный;  $\sigma = 4.9$ ), а среднеемноголетнее значение составило 21 (слегка засушливый). Умеренно засушливые условия также доминировали в весенний, летний и осенний сезоны (43, 55 и 47% случаев соответственно).

Среднеемноголетнее значение индекса  $I_{DM}$  составило: в весенний сезон 21 (слегка засушливый) при диапазоне изменения в пределах от 5 до 46 ( $\sigma = 9.1$ ); в летний сезон 16 (умеренно засушливый) при диапазоне изменения в пределах от 4 до 36 ( $\sigma = 7.0$ ); в осенний сезон 19 (умеренно засушливый) при диапазоне изменения в пределах от 2 до 49 ( $\sigma = 8.6$ ). Наиболее влажные условия закономерно отмечены в зимний сезон: гидротермические условия в 47% случаев характеризовались как чрезмерно влажные. При этом значения индекса  $I_{DM}$  зимой варьировало в пределах от 20 до 244 ( $\sigma = 38.1$ ), а среднеемноголетнее значение индекса  $I_{DM}$  составило 64. За период 1961-2020 гг. наибольшее сезонное значение индекса  $I_{DM} = 244$  отмечено в зимний сезон в 1972 г., когда наблюдалась наименьшая сезонная температура. Наименьшее сезонное значение индекса  $I_{DM} = 2$  отмечено осенью в 1982 году, когда наблюдалось наименьшее за сезон количество выпавших осадков.

**Таблица.** Сезонный и годовой характер гидротермических условий метеорологической станции Ремонтное в период 1961-2020 гг. на основании значений индекса аридности де Мартона ( $I_{DM}$ ).

Режим увлажнения	Значение $I_{DM}$	Зимний сезон	Весенний сезон	Летний сезон	Осенний сезон	Годовой
Полузасушливый	$I_{DM} < 10$	0%	8%	23%	15%	0%
Умеренно засушливый	$10 \leq I_{DM} < 20$	2%	43%	55%	47%	47%
Слегка засушливый	$20 \leq I_{DM} < 24$	2%	13%	10%	13%	28%
Умеренно влажный	$24 \leq I_{DM} < 28$	3%	17%	5%	13%	22%
Влажный	$28 \leq I_{DM} < 35$	13%	10%	5%	8%	3%
Очень влажный	$35 \leq I_{DM} < 55$	33%	8%	2%	3%	0%
Чрезмерно влажный	$I_{DM} > 55$	47%	0%	0%	0%	0%

### Выводы

В период 1961-2020 гг. на метеорологической станции Ремонтное наблюдалось преимущественно значимое увеличение как среднесезонной, так и среднегодовой температуры соответственно. Незначимая тенденция снижения числа осадков за аналогичный период отмечалась только в летний сезон, а увеличение осадков в остальные сезоны определило их положительную (но незначительную и незначимую) годовую динамику. С использованием индекса аридности де Мартона показано, что для метеорологической станции Ремонтное в период 1961-2020 гг. в 75% случаев годовой режим гидротермических условий характеризовался как умеренно и слегка засушливый. Умеренно засушливые условия также доминировали в весенний (43% случаев), летний (55% случаев) и осенний (47% случаев) сезоны. Анализ тенденций показал, что сезонные изменения температурного режима и количества осадков в исследуемый период привели к смещению характера гидротермических условий. В зимний и летний сезоны, когда наблюдался наибольший рост средней температуры, а увеличение осадков было минимально или снижалось, отмечена тенденция смещения режима гидротермических условий к более засушливому. В весенний и осенний сезоны на фоне менее выраженного роста средней температуры, но более заметного увеличения осадков, режим гидротермических условий смещался к более влажному. На годовом интервале рост количества осадков, в целом, компенсирует увеличение температур. В результате в ходе анализа было показано



медленное смещение годового режима гидротермических условий к более влажному. Таким образом, на основании рассчитанных тенденций можно заключить, что в период 1961-2020 гг. на метеостанции Ремонтное отмечено гумидное потепление.

*Финансирование.* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания Минобрнауки России в области научной деятельности (№ 0852-2020-0029) «Фундаментальные основы агро- и экобиотехнологий для устойчивого функционирования естественных и антропогенных экосистем».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдуллаева Р.З., Безуглова О.С.* 2016. Изменение климата как фактор опустынивания на юго-востоке Ростовской области. Природные и антропогенные изменения аридных экосистем и борьба с опустыниванием // Труды института геологии Дагестанского НЦ РАН. Вып. 67. С. 29-31.
- Безуглова О.С., Назаренко О.Г., Ильинская И.Н.* 2020. Динамика деградации земель в Ростовской области // Аридные экосистемы. Т. 26. № 2 (83). С. 10-15. [*Bezuglova O.S., Nazarenko O.G., Ilyinskaya I.N.* 2020. Land Degradation Dynamics in Rostov Oblast // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 2. P. 87-92.]
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* 2022. «Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR)» Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942 [Электронный ресурс <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 18.05.2022)].
- Гудко В.Н., Усатов А.В., Азарин К.В.* 2021. Анализ гидротермических условий в Ростовской области за период 1960-2019 гг. // Аридные экосистемы. Том 27. № 4 (89). С. 25-31. [*Gudko V.N., Usatov A.V., Azarin K.V.* 2021. Analysis of hydrothermal conditions in the Rostov Region in the Period 1960-2019 // Arid Ecosystems. Vol. 11. No. 3. P. 337-342.]
- Шумова Н.А.* 2020. Анализ климатических условий в Республике Калмыкия за 1966-2017 гг. // Аридные экосистемы. Т. 26. № 3 (84). С. 23-29. [*Shumova N.A.* 2020. Analysis of Climatic Conditions in the Republic of Kalmykia for 1966-2017 // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 3. P. 188-193.]
- Шумова Н.А.* 2021. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в Республике Калмыкия // Аридные экосистемы. Том 27. № 4 (89). С. 13-24. [*Shumova N.A.* 2021. Quantitative Climate Indicators Applied to the Assessment of Hydrothermal Conditions in the Republic of Kalmykia // Arid Ecosystems. Vol. 11. No. 4. P. 327-336.]
- Andrade C, Corte-Real J.* 2016. Aridity conditions in the Iberian Peninsula during the XX century // International Journal of Environmental Science. Vol. 1. P. 52-58
- De Martonne E.* 1926. L'indice d'aridité // Bulletin de l'Association de géographes français Vol. 9. No. 3. P. 3-5.
- Mann H.B.* 1945. Non-parametric tests against trend. Econometrica Vol. 13. 245-259 p.
- Vlăduț A.Ș., Licurici M.* 2020. Aridity conditions within the region of Oltenia (Romania) from 1961 to 2015 // Theoretical and Applied Climatology. Vol. 140. No. 1. P. 589-602.

## О ПОЧВЕННО-ГЕОГРАФИЧЕСКОМ ФЕНОМЕНЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ ЮГА РОССИИ

© 2023 г. З.Г. Залибеков, С.А. Мамаев, Р.А. Магомедов, М.А. Мусаев, П.Д. Мусалаева

*Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН  
Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, д. 75. E-mail: bfdgu@.ru*

Поступила в редакцию 14.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

Территория Европейской части юга России объединяет регионы, расположенные между двумя материкообразующими морями: Черным морем с северо-запада и Каспийским морем с юго-востока. Между указанными морями в субмеридиональном направлении с общей протяженностью более 1.5 тыс. км и разнообразием элементов рельефа протягиваются Кавказские горы. К северу от них, в пределах 42°-48° с.ш., 38°-49° в.д., расположены умеренный и субтропический пояса степей, полупустынь, пустынь, лесной и кустарниковой растительности (Докучаев, 1951).

В рамках общих закономерностей учения о зонах природы сформулированы представления об общепринятых параллелях и меридианах, вдоль которых протягиваются системы в большинстве случаев с повышенной геодинамической активностью. В отдельных континентах четко выделяется приуроченность широтных горных поясов к 36°-60° параллелям, охватывающим широкий диапазон формирования ландшафтов и почвенного покрова. Общеизвестно, что в пределах 30°-40° с.ш. в атмосфере наблюдается максимум давления, за что они получили название «ревущие широты», откуда дуют ветры с переходом в группу сильных бурь катастрофических масштабов, оказывающих влияние на развитие процессов аридизации и опустынивания.

*Ключевые слова:* географические пояса, континенты, атмосферное давление, горные системы, иссушение, ксероморфизм, картографический анализ, смена почвенных зон, состав почвенного покрова.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-36-44**

**EDN: OZIERA**

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужили опубликованные и фондовые материалы картографических работ по составлению «Почвенной карты мира» (1974) и «Почвенной карты России и сопредельных государств» (1995), изданной географическим факультетом Московского государственного университета. Использованы также «Почвенная карта Дагестана» (2000), почвенные карты Калмыкии и других регионов Прикаспийской и Арало-Каспийской низменностей. Для характеристики качественного состояния почв в данных регионах, подверженных опустыниванию, были проведены рекогносцировочные полевые почвенные, геоботанические исследования очагов опустынивания и ареалов движущихся песков с охватом густонаселенных регионов. Учитывая значительную протяженность региона в широтном направлении, проведенными исследованиями выявлено выпадение лесостепных и лесных почв, черноземов степей и луговых степей, каштановых почв сухих степей и других. Сужение горизонтальных почвенных зон происходит за счет горных массивов, гидрографии территории, элементов рельефа тектонического происхождения. Формирование гидроморфных почв и их комплексов с последующим выпадением почвенных зон, характерных для «идеального» фона горизонтальной зональности, происходит в условиях влияния морских систем (Черного и Каспийского морей), что способствует развитию сильных атмосферных потоков, движущихся по равнинам разных континентов. В этом регионе периодически возникает интенсивное движение сухих воздушных потоков с чередованием различий в величине атмосферного давления, создаваемого Каспийским морем и Кавказскими горами. Различия дифференцируемых элементов рельефа горной системы и их взаимодействие с атмосферой гор и водной поверхностью способствуют изменению климатических условий и в прилегающих регионах. При этом формируется

особый тип распространения разнообразия почв в комплексе объектов литогенного, гидрогенного происхождения (Неуструев, 1930). К ним относятся песчаные, глинистые отложения, светло-каштановые почвы и солончаки, подвергающиеся эоловому переносу на значительные расстояния.

При воздействии различий атмосферного давления, создаваемого Черным и Каспийским морями и горной территорией Кавказа, взаимодействие и непосредственная связь между сушей и водной поверхностью вызывают изменения климата и его элементов: интенсивность ветров противоположных направлений, термический режим приземного слоя атмосферы (Агроклиматический справочник ..., 1963), формирование новых форм рельефа на поверхности земли при аномальной структуре высотных поясов, расположенных между горами и водной поверхностью, вытянутой в меридиональном направлении. Большое значение имеет также изменение термического режима региона, обусловленного различиями горного рельефа и водной поверхностью. Формирующие изменения вносят новые признаки в общепринятый состав зонального распространения почв (Захаров, 1939). Прежде всего, проявляется влияние Кавказских гор на воздушные потоки, идущие с противоположных сторон, что способствует расширению площадей, охваченных воздушными потоками, и движущихся песков (Акаев, 1996; Мирзоев, 1975).

Горизонтальные почвенные зоны Русской равнины на юге меняют первоначальное направление, приобретая неупорядоченную систему распространения. Феноменальность развития этого процесса характеризуется формированием структуры земной поверхности, подверженной влиянию сильных ураганных ветров и других аномальных природных явлений с развитием эоловой дефляции. Проявление их сопровождается изменениями в качественном составе разнообразия почв от простого (первичного) уровня до глубоких, необратимых изменений, которые вызывают деградацию почв и опустынивание территорий (Залибеков, 2010; Дьяченко, Матасова, 2016).

Перемена направлений движения воздушных масс и влияние рельефа местности способствуют аккумуляции мелкозема в понижениях рельефа и выдуванию с поверхности положительных элементов рельефа, тем самым лишая почву запасов влаги. Их развитие приводит к формированию почв и непочвенных образований, характерных для равнинных территорий Европейской части юга России. Иллюстрацией этого является сильное развитие ветровой эрозии, пыльных бурь с последующим уничтожением посевов, строений и промышленных объектов в Калмыкии, Дагестане, Ставропольском крае, Волгоградской и Астраханской областях.

### Результаты и обсуждение

Процессы иссушения и проникновение тепловой энергии внутрь почвенной массы происходит преимущественно в верхней полуметровой толще профиля на разрыхленной, обнаженной поверхности. Потеря влаги при иссушении дестабилизирует состояние почвенного покрова и создает почвенную массу, усиливает ее податливость эоловому процессу с превращением почвенной массы в категорию элементов литогенеза. Формируется особая форма – феномен, обусловленный сложной системой циркуляции воздуха, воздействием элементов горного рельефа и гидрологического режима равнин (Фридланд, 1957). Природная схема распространения почвенных зон, развитие которых протекает под влиянием высоких летних температур и естественной дренированности территории, характеризуется повышенным ксероморфизмом. На рассматриваемой территории, обрамленной горной системой и морями, а также крупными речными системами, проявляются денудация, эоловые процессы с уменьшением количества осадков и падением уровня грунтовых вод.

Из особенностей физико-географических условий следует подчеркнуть следующие:

– при переходе в южное направление в рельефе отмечается смена элементов равнин горными образованиями, способствующими развитию почвенно-растительного покрова, характерного для природных зон юга России;

– смена горизонтальной зональности почв на вертикальную, с проявлением разных вариантов чередования почв в зависимости от высоты местности, экспозиции и крутизны склонов, включая антропогенную деятельность человека;

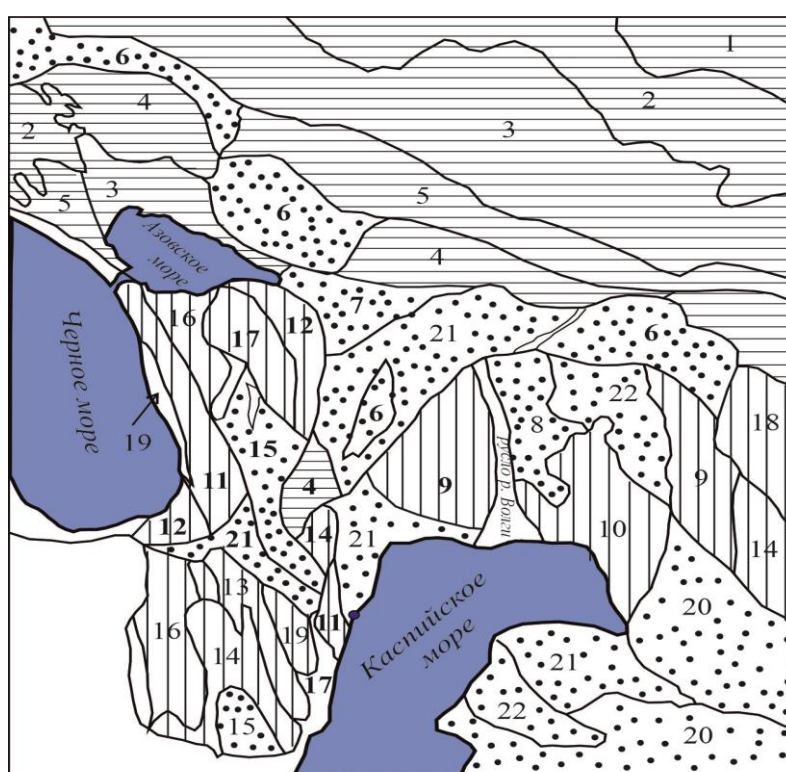
– переход широтно-горизонтальной зональности равнин к динамичной природной среде ассимилируется процессами, интенсивно протекающими в процессе горного почвообразования;

– функционирование горных экосистем в условиях контакта с морями (с востока и запада) способствует обмену веществ и энергией между сушей, гидросферой и атмосферой региона;

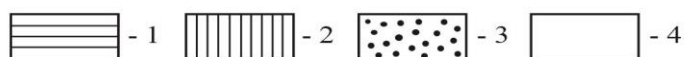
наблюдается концентрация сухих движущихся воздушных масс в пространстве, последствия чего являются непрогнозируемыми (Белоусова и др., 2012).

Сложное, многокомпонентное, неупорядоченное взаимодействие факторов почвообразования привело к формированию центра опустынивания и аридизации на Европейской части юга России, расположенного на территории Калмыкии, Дагестана и частично в Волгоградской и Астраханской областях (Стасюк, 2005). Регион, относящийся к центру и очагам опустынивания, представлен почвами, подверженным изменениям на уровне типовых, подтиповых и внутризональных различий; они испытывают влияние органических веществ в результате освоения почв под сельскохозяйственные культуры (Суховеева, 2022). Внутризональные градации проявления опустынивания (слабое, среднее, сильное) имеют более широкое распространение и охватывают регионы неустойчивого увлажнения средних широт (Залибеков и др., 2020).

На представленном фрагменте схематической почвенной карты распространения почвенных зон Европейской части юга России (рис.) приведены основные типы почв, ареалы которых расположены в зоне влияния факторов горного рельефа, водной поверхности морей и антропогенного фактора.



условные обозначения



**Рис.** Фрагмент схематической карты распространения почвенных зон Европейской части юга России. Условные обозначения. Зональность почв: 1 – широтная, 2 – меридиональная, 3 – смешанная, 4 – прибрежно-морская. Названия выделов, обозначенных цифрами, приведены во второй графе таблицы 1.

Максимальную площадь в рассматриваемой территории занимают черноземы типичные, южные, темнокаштановые, каштановые почвы. Как видно из приведенного рисунка, ареалы их распространены в северной части центра опустынивания. Южнее располагается феноменальная часть территории, где изменены границы почвенных зон в широтном направлении. Южные границы центральной части ареала черноземов подвергаются изменениям и теряют широтную ориентацию. Эти изменения сопровождаются приобретением признаков, характерных для ксероморфизма. Южнее черноземов распространены каштановые, темно-каштановые почвы, ареалы которых постепенно

теряют широтное расположение в соответствии со структурой, измененной зональностью почв. С приобретением признаков меридиональной зональности смещение естественных границ почвенных типов показано как дифференцирующий фактор распространения почвенных зон при изменении широтной горизонтальной зональности. Картографический анализ распространения почвенного покрова свидетельствует об изменении установленной географической закономерности распространения почвенных зон для условий равнин и низкогорных территорий (Классификация и диагностика почв России, 2004).

**Таблица 1.** Схема распространения почвенных типов на Европейской части юга России.

№ п/п	Зональные типы почв	Координаты	Регион	Границы почвенных зон	
				Формы	Виды
1	Серые лесные	46°-49° с.ш.	Русская равнина	полосчатые	зональные
2	Черноземы обыкновенные	42°-44° с.ш.	Русская равнина	полосчато-линейные	зонально-провинциальные
3	Черноземы южные	44°-56° с.ш.	Юг Русской равнины	полосчато-линзовидные	зональные
4	Черноземы солонцеватые	44°-57° с.ш.	Юг Русской равнины	полосчатые	зональные
5	Темно каштановые, каштановые	39°-42° с.ш.	Западное Предкавказье	полосчато-линзовидные	структурные
6	Каштановые карбонатные	36°-44° с.ш.	Центральное Предкавказье, Прикаспийская низменность	гомогенные	зональные
7	Светло каштановые в комплексе с луговыми почвами	35°-39° с.ш.	Восточный Прикаспий	полосчато-линзовидные	структурно-зональные
8	Бурые пустынные солонцеватые	42°-45° с.ш.	Восточный Прикаспий	линейные	классификационные
9	Солончаки в комплексе с бурыми пустынными	41°-45° с.ш.	Депрессии Предкавказья	аналитические пятнистые	аналитические
10	Солонцы в комплексе с бурыми пустынными	41°-45° с.ш.	Депрессии Предкавказья, Западный Прикаспий	округло-линзовидные	аналитические
11	Лугово-болотные	41°-45° с.ш.	Долинные, бессточные участки	округлые	структурные
12	Коричневые сухих лесов	40°-44° с.ш.	Восточное Предкавказье	линейные	зонально-провинциальные
13	Бурые лесные	40°-42° с.ш.	Предкавказье, предгорье	линейно-полосчатые	зонально-провинциальные
14	Бурые лесные оподзоленные	40°-43° с.ш.	Предкавказье, среднегорье	линейно-полосчатые	аналитические
15	Высокогорные тундровые	40°-44° с.ш.	Главный Кавказский хребет	струйчатые	зонально-провинциальные
16	Горные сероземы	42°-46° с.ш.	Среднегорье Кавказа	полосчатые	структурные

Продолжение таблицы 1.

№ п/п	Зональные типы почв	Координаты	Регион	Границы почвенных зон	
				Формы	Виды
17	Горно-луговые Дерновые	40°-49° с.ш.	Высокогорье Кавказа	древовидные	зональные
18	Горно-луговые	41°-50° с.ш.	Среднегорье, высокогорье Кавказа	линейные древовидные	структурно- однородные
19	Горные черноземы	45°-49° с.ш.	Среднегорье, плато	линейные	зонально- провинциальные
20	Бурые, пустынные в комплексе с песками	44°-48° с.ш.	Прикаспийская низменность	линейно- полосчатые	зональные
21	Такыры	44°-50° с.ш.	Восточный Прикаспий	полосчатые	аналитические
22	Пески движущиеся	44°-52° с.ш.	Арало-Каспийская низменность	неупорядоченные	–

Существование критических параллелей и взаимное расположение глобальных элементов описываются, как географическая гомология с тенденцией расширяться к северу и сужаться к югу. Это наблюдается на территории юга Европейской части России, являясь феноменом в распространении зональности почв, растительности и животного мира. Можно полагать, что происходящие изменения в распространении живой природы представляют аномалию зональности распределения компонентов живой природы, укладываемой в рамках закономерностей развития географической гомологии (Зонн, 1997).

Смена почвенных зон в южном направлении от Арктики до экватора сохраняется в широтной протяженности до умеренно-теплого географического пояса, расположенного в пределах 45-47° с.ш. Перечень сменяемых почвенных зон иллюстрирует характерные особенности горизонтальной зональности при достижении контуров зоны светлокаштановых полупустынных и бурых пустынных почв. Определяющую роль в распространении почвенных зон играет влияние комплекса факторов: горной системы Кавказа, водной поверхности морей и рек, состава и строения почвообразующих пород в локальном и региональных аспектах. Почвенный покров испытывает здесь влияние условий, не свойственных горизонтальной зональности, но способствующих формированию автоморфных, полугидроморфных почв и их комплексов. Большое значение имеет формирование почв, резко отличающихся по гранулометрическому составу, включая ареалы песков, супесей и галечных отложений. Особое значение в почвообразовании и формировании ландшафтов приобретают эоловые процессы с миграцией мелкоземистой части почв за счет воздушных потоков.

Главной особенностью распространения ареалов почв на уровне типового, подтипового подразделения является размещение почв высшего таксономического уровня в полосе географических параллелей 39°-50° с.ш. в условиях сильной уплотнённости. Это означает, что количественная сторона факторов, оказывающих влияние на свойства почв, увеличивается в южном направлении. Среди этих факторов наиболее важными являются горный рельеф Кавказа, изменение высоты местности, экспозиции и крутизны склонов, включая гидрологические условия. Значительная протяженность в меридиональном направлении горных склонов формирует высотную зональность почвенно-растительного покрова, показатели которой зависят от степени влияния атмосферных потоков, идущих с Каспийского моря. Региональные различия формирования в почвенном покрове отдельных зон, обладающих максимумом атмосферного давления, приводят к образованию «ревущих широт» в пределах южных регионов Европейской части России. Их возникновение является основной причиной засушливости климата и проявления процессов аридизации и опустынивания. Рассматриваемое явление, определяющее количественные показатели почвенных ресурсов, имеет широкое распространение в Калмыкии, северном Дагестане, Астраханской области и на других территориях.

Общая структура распространения почвенных зон на Европейской части юга России показывает

закономерную смену широтных почвенных зон по мере приближения к горной системе. Энергетические ресурсы почв зависят от количества тепла и влаги. Уменьшение долевого участия широтных зон в структуре территории региона способствует прогрессирующему расширению меридиональной смешанной зональности. Изменение состава географической среды различных зон (биокомпонентов) оказывает непосредственное влияние на изменение давления и плотности поверхностных слоев литосферы. Такой характер изменения зональности почв обуславливает уменьшение плотности почв и появлению ветровой эрозии.

Выделенные особенности охватывают ареалы генетических разностей, границы которых совпадают с границами почвенных зон. Учитывая это, мы включили в приведенный ниже список внутритиповые, подтиповые классификационные единицы. На первом этапе была принята попытка определить изменчивость и направление формирования свойств почв на высшем классификационном уровне – типов почв (табл. 1). При этом появилась возможность определить степень влияния зонального климатического фактора почвообразования в зависимости от влияния:

– атмосферных процессов, способствующих изменению температурного режима, давления, влажности и их соотношения во времени и в пространстве;

– гидрологического режима суши, определяющего соотношения тепла и влаги, и их функционирования в определенном режиме как движущегося фактора развития состава и структуры почвенного покрова.

Изменение соотношения элементов климата (тепла и влаги) и их влияния на формирующиеся различия природной среды приводят к смене почв и ареалов их распространения. Формирование типовых различий свойств почв и их трансформация протекают в результате изменения форм и границ почвенных контуров в зональном аспекте (Глазовская, 1949).

На схематической карте показаны почвенные зоны и степень изменения их структуры, площадей, форм, видов и других картографических показателей (Северный Кавказ, Прикаспийская, Приволжская низменности). Границы почвенных зон формируются в виде линий, отделяющих классификационные единицы. Они формируются условно однородными на высоком классификационном уровне, а на более низком – выделением единиц разного уровня. Каждая выделенная картографическая единица, дифференцирующая почвенно-классификационные ареалы, иллюстрирует смену зонально-провинциального строения почвенного покрова. Границы почв на карте проведены на уровне типового подразделения с учетом критериев, определяющих генетические особенности почв, используемых в природоохранных и сельскохозяйственных целях (Зонн, 1940, 1978).

Возникновение зонально-провинциальных границ обусловлено изменениями климатических условий и связанным с ними появлением многообразия различий водного и теплового режимов почв, процессов обмена веществ между атмосферой, литосферой, гидросферой. Большое значение имеет учет различий, обусловленных атмосферными процессами, воздействием сильных ураганных ветров, изменением температуры воздуха, количества осадков и солнечной радиации. Пространственные изменения климатических условий происходят с разной скоростью, поскольку равнинные условия чередуются с горными. В то же время резкие смены в климате почвенных типов в южном направлении стабилизируются влиянием почвообразующих пород и растительностью.

В межгорных равнинах происходит излучение тепла Землей, величина которого значительно превышает поступление. Поэтому на равнинных участках, включая и прилегающие территории, температура воздуха оказывается более высокой, а количество осадков уменьшается до минимума. Однако давление воздуха на равнине и в низких широтах достигает высоких показателей. Изменение климатических условий равнин, их сочетаний, размеров и интенсивности физико-химических реакций, происходящих в почвах, приводят к усилению скорости движения воздушных масс, прилегающих к поверхности Земли. Они способствуют потерям влаги атмосферными потоками и зависят от свойств почвообразующих пород, растительности и деятельности человека. Атмосферные потоки, лишенные влаги, движутся в юго-восточном направлении, достигая Арало-Каспийской низменности (Акимцев, 1957).

Радикальные изменения, происходящие в горизонтальном направлении, способствуют появлению динамических изменений в соотношении тепла и влаги. Изменение гидротермического режима, имеющего первостепенное значение в формировании почвенно-растительного покрова,

способствует горизонтальной дифференцируемости территорий, отличающихся по степени уменьшения гидротермического коэффициента до стадий формирования процессов остепнения, аридизации и опустынивания (Вильямс, 1949; Ковда, 1985). Зональные почвы испытывают резкие изменения и теряют широтно-горизонтальную направленность. Неупорядоченное изменение почвенных границ и нарастающий диапазон колебаний высотных отметок привели к расширению зоны аридизации климата с образованием почв, характерных для засушливых климатических условий. Почвенный покров под атмосферным давлением горной системы, расположенный в середине материкообразующих морей Каспия и Черного моря, способствует усилению взаимодействий между увлажненными морскими воздушными течениями и слабонасыщенной влагой потоками горного воздуха. Формируются почвы и почвоподобные тела (такты, пески) по особому направлению климатической провинциальности в распространении аридных почв (Кулик, 2001).

Климатическая провинциальность почв характеризуется усилением засушливости условий уменьшением количества осадков и увеличением температуры воздуха. Границы почвенных зон приобретают меридиональную направленность (Каримханов, 1973). В качестве примера можно привести почвенные зоны Арало-Каспийской низменности, где почвенный покров, поверхностные образования развиваются под влиянием термического фактора. Элементы климатической провинциальности, динамичность форм контуров, меридиональный характер распространения, пестрота почв по степени эродированности отражают генетические, функциональные и планетарные связи факторов аридного типа почвообразования.

Усложнение строения почвенного покрова и закономерностей во взаимодействиях с атмосферой суши, обусловленных Кавказскими горами (низкое давление) и водной поверхностью омывающих морей (высокое давление), сформировали воздушные потоки разных направлений, охватив южные регионы Европейской части России (табл. 2.)

**Таблица 2.** Элементы почвенных границ и водный режим почв Европейской части юга России.

Элементы почвенных границ	Почвы	Типы водного режима	Распространение
Зональные	Атмосферные	Стабильно не промывной	Равнинные условия в системе горизонтальной зональности
Внутри зональные	Полугидроморфные	Периодически промывной	Равнинные условия в системе горизонтальной зональности
Интрозональные	Гидроморфные	Стабильно промывной	Равнинно бессточные участки
Контуров картографически выделенных единиц	Автоморфные периодически полугидроморфные	Периодически промывной	Условия вертикальной зональности
Антропогенные	Преобразованные	Не промывной	Северные, северо-восточные склоны, среднегории

Значительное разнообразие и многокомпонентный состав почв, отличающихся широким диапазоном водного режима, от крайнеаридных до максимально увлажненных, способствуют формированию нескольких уровней организации различных группировок, где выделяется ведущая роль географических закономерностей. Их проявление связано с наличием энергетического потенциала, способного изменить внутреннее строение почвенного покрова. Для почвенных контуров, расположенных южнее переходной полосы, характерны параллельность границ, соответствующих показателям водного режима почв. При параллельности почвенно-географических границ наблюдается изменение количества атмосферных осадков и водного режима, оказавших влияние на сближение контуров (южнее Ростовской области) и образовавших звенья густых границ, ориентированных в меридиональном направлении (Залибеков, 1979).



Из фрагмента схематической карты распространения почвенных зон видно, что территория, где сближаются границы почвенных контуров, характеризуются меньшими градиентами водного режима почв: их отличие – расположение с большой удаленности одна от другой.

Сближение меридионального направления проявляется в системе организации почв на типовом и подтиповом уровнях. Для подтверждения можно привести почвенно-географические границы между каштановыми и светлокаштановыми почвами Ставропольского края и республики Калмыкия. Еще более резко выражено сближение зональных почвенно-географических границ в Краснодарском крае при переходе темнокаштановых почв к каштановым.

Изучение почвенного покрова территорий, характеризующихся сближением границ меридионального направления, позволяет определить критические значения водного режима как фактора дифференциации почвенных границ под влиянием изменяющегося соотношения тепла и влаги. Это характерно для условий предгорий и предгорных равнин Западного Предкавказья. На территориях, где параллельные границы не сближаются или отодвигаются, возрастает вероятность усиления засушливости климата и аридизации региона (Фридланд, 1986).

Эволюция почвенного покрова в условиях уменьшения атмосферных осадков четко выделяется в сложном геометрическом рисунке почвенного покрова, иллюстрируя взаимодействия широтно-горизонтальной с одной стороны и меридиональной зональности с другой. Развитие почвенного покрова Европейского юга России с прогрессирующим нарастанием роли аридного климата представляет основу познания географического феномена – опустынивание территорий.

### Выводы

Выявление закономерностей распространения зональности почв на Европейской части юга России представляет основу для определения главных направлений развития природных процессов в современных условиях климатического потепления.

1. Южные регионы России расположены между умеренным поясом степей и субтропическим поясом пустынь, где широтная зональность почв сменяется меридиональной, обладающей высокой активностью. Это связано с высоким атмосферным давлением, вызванным фациальными особенностями и превращением почв в категорию объектов литогенеза.

2. Формирование пояса максимального атмосферного давления и «ревущих широт» (30°-40° с.ш.) привели к образованию воздушных потоков сильных ветров и пыльных бурь. Увеличение степени засушливости и изменение соотношения тепла и влаги стали результатом их взаимодействия – появление процессов аридизации, опустынивания. Основная причина – повторяемость спектра чередования почвенных зон с севера на юг и с юга на север как почвенно-географического феномена Европейского юга России.

3. Смена почвенных зон в полосе влияния Кавказских гор сопровождается сужением к югу зональных границ под влиянием водной поверхности морей, омывающих с востока и запада, и критических параллелей северных широт. Процессы сужения к югу и расширения к северу почвенных зон и изменение их широтной ориентированности рассматриваются как географическая гомология природных зон суши океанической фации.

4. Влияние горного рельефа Кавказа на распространение почвенных зон определяется радикальными изменениями в степени увлажнения и температурного режима почв. Горный рельеф приводит к дифференциации ареалов почв по высотным отметкам: в нижней части Главного хребта на высотах меньше 2000 м н.у.м. БС – по фактору увлажнения, а в верхней части, выше 2000 м н.у.м. БС, – по температурному режиму. Дифференциация почвенных зон по указанным высотам имеет общебиосферное значение в оценке процессов иссушения и аридизации.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках Государственного задания Института геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН «Ландшафтно-геохимическое районирование Прикаспийской низменности», раздел 1, № ААА-А117-117021310199-9 «Разработка методологических основ изучения гумусового состояния и засоления почв в целях ландшафтно-геохимического районирования аридных территорий», тема 3, № АААА-А17-117021310203-3 «Эколого-геохимические особенности подземных вод Северо-Восточного Кавказа (Дагестана). Природные и антропогенные факторы загрязнения».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматический справочник по Дагестанской АССР. 1963. Л.: Гидролитиздат СССР. 84 с.
- Акаев Б.А. 1996. Геологическое строение Дагестана // Физическая география Дагестана. М.: Школа. С. 32-68.
- Акимцев В.В. 1957. Почвы Прикаспийской низменности Кавказа. Ростов-на-Дону: 282 с.
- Белоусова Н.И., Назимова Д.И., Андреева Н.М. 2012. Анализ почвенно-климатических связей на основе почвенной карты и базы данных «Биом» // Почвоведение. С. 131-141.
- Вильямс В.Р. 1949. Стенной период почвообразовательного процесса. // Почвоведение. М. С. 226-275.
- Глазовская М.А. 1949. Почвы горных областей Казахстана // Известия АН Казахской ССР. Серия «Почвоведение». № 4. С. 134-147.
- Докучаев В.В. 1951. К учению о зонах природы. Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. Соч. Т. 4. С. 398-414.
- Дьяченко В.В., Матасова И.Ю. 2016. Региональные кларки химических элементов в почвах Европейской части Юга России // Почвоведение. № 10. С. 1159-1167.
- Залибеков З.Г. 1979. Анализ антропогенного использования почвенных ресурсов Дагестана // Почвоведение. № 5. С. 38-48.
- Залибеков З.Г. 2010. О закономерностях высотной организации почв горных территорий // Известия ВУЗов. Северокавказский регион. Естественные науки. № 3. С. 71-75.
- Залибеков З.Г., Маммаев С.А., Гринченко О.С., Котенко М.Е., Магомедов Р.А. 2020. О приоритетах развития стратегии исследований засушливых земель мира // Аридные экосистемы. № 3. С. 3-13. [Zalibekov Z.G., Mamaev S.A., Kotenko M.E., Magomedov R.A. 2020. Priorities in the Development of the Research Strategy for Arid Lands of the World // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 3. P. 171-180.]
- Захаров С.А. 1939. Почвы Предкавказья. Почвы СССР. Т. 3. С. 140-153.
- Зонн С.В. 1940. Почвы Дагестана. Сельское хозяйство Горного Дагестана. М.: Т. 1. С. 194-210.
- Зонн С.В. 1978. Вопросы преобразования почв Дагестана в связи с интенсификацией их освоения // Биологическая продуктивность дельтовых экосистем. Махачкала. С. 68-74.
- Зонн И.С. 1997. Конференция в Найроби: Проблемы опустынивания – 20 лет спустя // Аридные экосистемы. Т. 3. № 6. С. 12-21.
- Каримханов С.У. 1973. О влиянии экспозиции склонов на распространение почв в горном Дагестане // Почвоведение. № 2. С. 3-10.
- Классификация и диагностика почв России. 2004. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева РАСХНИЛ. 342 с.
- Ковда В.А. 1985. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука. 127 с.
- Кулик К.Н. 2001. Разработка субрегиональной программы юга-востока Европейской части РФ // Биологическое и почвенное разнообразие аридных экосистем южных регионов России. Волгоград. С. 12-22.
- Мирзоев Э. М-Р. 1975. Почвенно-мелиоративное районирование Северо-Дагестанской равнины. Махачкала. 26 с.
- Неуструев С.С. 1930. Элементы географии почв. Л.: 69 с.
- Почвенная карта мира. 1974. М 1: 10000000. Международное общество почвоведов. МГУ. 1 л.
- Почвенная карта Российской Федерации и сопредельных государств. 1995. М 1:4000000. МГУ. 1 л.
- Почвенная карта Дагестана. 2000. М 1: 200000. Прикаспийский институт биоресурсов ДНЦ РАН. 1 л.
- Стасюк Н.В. 2005. Динамика почвенного покрова дельты Терека. Махачкала. 194 с.
- Суховеева О.Э. 2022. Поступление органического углерода в почву с послеуборочными остатками сельскохозяйственных культур // Почвоведение. № 6. С. 737-747.
- Фридланд В.М. 1957. Опыт почвенно-геофизического разделения Кавказа // Вопросы генезиса географии почв. Изд. АН СССР. С. 94-111.
- Фридланд В.М. 1986. Основные положения почвенной картографии // Проблемы географии генезиса и классификации почв. М.: Наука. С. 119-147.

**О ВЛИЯНИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ  
АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЧВ**

© 2023 г. М-Р. А. Казиев\*, С.Н. Имашева\*, С.А. Теймуров\*, З.А. Баламирзоева\*\*

*\*Федеральный аграрный научный центр Республики Дагестан  
Россия, 367014, Республика Дагестан, г. Махачкала, МКР Научный городок,  
ул. А. Шахбанова, д. 30. E-mail: imashova86@mail.ru*

*\*\*Дагестанский государственный университет  
Россия, 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Магомеда Гаджиева, д. 43-а*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 10.01.2023. Принята к публикации 13.01.2023.

Глобальные климатические изменения, происходящие в современных условиях, являются определяющим фактором направления исследования по рациональному использованию почвенных ресурсов. В южных регионах России, включая Республику Дагестан, условия ведения сельского хозяйства усложняются засушливостью климата, прогрессирующей аридизацией и опустыниванием. Проводимые исследования показывают, что без учета направлений адаптационных изменений в состоянии почвенного покрова может быть нанесен ущерб в экономической эффективности разрабатываемых мероприятий. Поэтому поставлена цель определить комплекс региональных адаптационных изменений по снижению отрицательных воздействий связанных с проявлением засух, суховеев и пыльных бурь, оказывающих влияние на экономические показатели Дагестана.

*Ключевые слова:* адаптационные меры, регионы, климатические изменения, уязвимость, плодородие почв, восстановление травостоя, кормовые угодья, паспорт пастбищ.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-45-52**

**EDN: OEXJJV**

Адаптация к климатическим условиям рассматривается нами применительно для почвенного покрова, подверженного воздействиям климатических изменений в самом широком диапазоне засушливости и аридизации (Адаптация почвенных животных ..., 1977). Климатическая изменчивость оценена с учетом особенностей почвенного покрова и современного экологического развития. Выявление, определение адаптационных изменений проводились для региона Терско-Кумской низменности, где гидротермический режим и направленность воздействующих приемов являются определяющими. Цель работы – определение комплекса региональных адаптационных мер, направленных на снижение отрицательных последствий климата с последующим повышением устойчивости почв и продуктивность естественной растительности к ветровой эрозии, засухе, высоким и длительным периодом существования условий, обуславливающих уменьшение содержания доступной почвенной влаги. Для выполнения поставленной цели оценены существующие риски отрицательного влияния процессов ветровой эрозии, засоления и дегумификации почв.

Определенный объем исследований проведен по учету и определению бонитировочных показателей почв их плодородия и разработке предложений в целях снижения риска и создания благоприятных биосферных условий.

**Объекты и методы исследования**

В работе приведены результаты анализа современного состояния и использования ресурсоэкономического потенциала почв аридных экосистем одного из важнейших регионов Западного Прикаспия Терско-Кумской низменности. В полевых условиях определены основные типы почв, почвообразующих пород и растительного покрова. Полевая характеристика почв сопровождалась закладкой почвенных разрезов, отбором образцов по генетическим горизонтам. Составлен классификационный список почв региона с морфологической оценкой почвенных профилей.

По растительной части выявлены сообщества используемых в качестве кормов. Заложены укосные площади, определено видовое разнообразие с выделением эдификаторов. В отобранных пробах укосной массы проведены анализы по определению кормовых единиц и продуктивности. Результаты физических, химических и биохимических анализов получены с применением общепринятых методов аналитических работ. Значительный объем работ выполнен по сбору и обработке климатических осадков, количеству дней с сильными ветрами, суммами активных температур. Определена бонитировочная цена почв с учетом свойств, оказывающих влияние на их плодородие. Весь комплекс аналитических работ выполнен в почвенной лаборатории Прикаспийского института биоресурсов Федерального аграрного научного центра Республики Дагестан (2010-2015 гг.) и кафедре почвоведения Дагестанского государственного университета (2015-2020 гг.). По результатам полевых, лабораторных и картографических работ, установлена степень влияния засушливых климатических условий на адаптацию системы использования аридных ландшафтов Терско-Кумской низменности.

### Результаты исследований и обсуждение

Обладая значительными запасами неосвоенных земель, аридные территории представляют большой резерв в расширении площадей интенсивно используемых пахотных земель в сельскохозяйственном производстве. Продуктивность главнейших типов почв аридного режима изучена на разновидностях, используемых под природные кормовые угодья. Анализируя полученные данные (табл. 1) можно отметить, что с увеличением степени засушливости и угасания гидроморфного режима почвообразования уменьшается общая фитомасса растений и долевое участие массы подземных органов.

**Таблица 1.** Распределение фитомассы растительных сообществ кормовых угодий по типам почв, ц/га.

Почвы	Фитомасса		Отчуждаемая часть в виде урожая	Лимитирующие факторы	Проективное покрытие растений, %
	надземная	подземная			
Каштановые карбонатные	68.5	60.5	25.3	Засушливость климата	50-60
Светло-каштановые	35.8	70.6	10.1	Засушливость климата	30-50
Лугово-каштановые	77.5	52.3	13.7	Засушливость климата	50-60
Луговые карбонатные	70.0	66.1	7.9	Грунтовое увлажнение	50-60
Луговые солонцеватые	54.1	49.7	4.3	Солонцеватость	40-50
Солончаки луговые	11.5	30.4	9.0	Засоление	30-40
Солончаки типичные	8.8	33.1	5.1	Засушливость климата и засоление	20-30

Максимальная фитомасса образуется в каштановых и лугово-каштановых почвах, причем, соотношение надземной и подземной части фитомассы близки по величине. Такое соотношение объясняется ведущей ролью умеренно засушливого климата (Бабаев, 1989) среди почвообразующих факторов. В светло-каштановых почвах увеличивается степень влияния засушливости климата и соответственно уменьшается величина общей фитомассы с последующим увеличением соотношения массы подземных органов. Приведенное позволяет отметить, что влияние климатических рисков уменьшается с увеличением соотношения и величины функционирующих площадей почв с растительным покровом. Рассматриваемые пространственные параметры почвенного покрова на примере Терско-Кумской низменности выявляют общую закономерность – увеличение

функционирующих площадей почв, как показателя уменьшения риска, формирующегося засушливыми условиями. По полученным данным установлено, что высокое содержание функционирующих площадей почв пастбищ характерно низкопродуктивным почвам – солончакам типичным, солончакам луговым, где биологическая продуктивность очень низкая. Это свидетельствует о том, что антропогенное воздействие создает условия для развития процессов засоления, эрозии и солонцеватости. Риск, связанный с засолением, уменьшается при оптимизации пастбищных нагрузок. Перераспределение площадей по категориям почв, выполняющих техногенные функции, протекает по направлению увеличения площадей, лишенных биологической продуктивности под влиянием природных факторов – высоких температур, сильных ветров и периодически повторяющихся засух и суховеев.

Определяющим фактором возникновения экологического риска является аридный климатический режим, на фоне которого возникают локальные перераспределения функционирующих площадей почв (ФПП; табл. 2).

**Таблица 2.** Распределение категорий почв по стадиям опустынивания.

Величина ФПП	ФПП к общей площади, %	Стадии опустынивания	Почвы	Продуктивность
Очень высокая	> 95	Не выражено	Солончаки луговые, пески слабозакрепленные	Низкая
Высокая	90-95	Слабая	Солончаки типичные, светлокаштановые солончаковатые, светлокаштановые солонцеватые	Средняя
Средняя	85-90	Средняя	Луговые солончаковатые, лугово-каштановые	Выше средней
Ниже среднего	80-85		Лугово-каштановые солонцеватые, пески закрепленные	Нестабильная средняя
Низкая	70-85	Средняя	Каштановые солонцеватые, каштановые карбонатные	Средняя
Очень низкая	<70	сильная	Светлокаштановые слаборазвитые, солончаки корковые, солончаки соровые	Выше средней

Перераспределение площадей по категориям почв в зависимости от стадий опустынивания иллюстрирует трансформацию их под влиянием природных и антропогенных факторов. Из природных факторов ведущими здесь являются пустынный климатический режим, а из антропогенных – ненормированная система выпаса скота. Переход одной категории почв в другую происходит при смене стадий опустынивания с затратой энергии и наличия движущихся сил, способных перевести функционирующее состояние почв в нефункционирующие. Для раскрытия механизма распределения биосферных категорий почв целесообразно ввести понятие «деградационного градиента», с которым связана напряженность трансформации категории почв.

Динамика взаимодействия антропогенных и природных факторов, создающая деградационный градиент на фоне изменяющегося равновесия способствует развитию постоянно действующих свойств в соотношении сохраняющейся и нарушенной части почвенного покрова. В результате изменения размера площадей функционирующих почв расширяется нарушенная часть почвенного покрова, формируются признаки ландшафтной неоднородности. Основные направления формирования неоднородных по продуктивности и составу почв характеризуется развитием зональных признаков (Залибеков, 1996).

*Климатическая или автономная* неоднородность почв обуславливается зональными факторами почвообразования. Существенная особенность распределения биомассы автоморфных почв – значительное преобладание подземной фитомассы, долевое участие которой в общей фитомассе составляет более 80%. Своеобразные отличия органического вещества почв засушливых регионов проявляются во влиянии состава фитомассы растительных сообществ.

Одной из основных закономерностей автономной неоднородности является высокая потенциальная способность накопления во времени и пространстве биомассы живых организмов (Залибеков, 1995).

*Гидрогенная неоднородность*, связанная с выявлением фактора увлажнения поверхностными и подземными водами. Отчетливое проявление признаков плодородия аридных земель региона при орошении обусловлено дополнительным увлажнением, способствующим сохранению разнообразия функционирующих разновидностей почв. В зависимости от степени обеспеченности почв влагой формируются признаки почвенно-растительного покрова свойственные гидрогенной неоднородности. Действия этих факторов приводят к формированию мозаичности почвенного покрова и пестроте видового состава растений. При воздействии гидрогенного фактора биогеоценозы резко изменяются по продуктивности, устойчивости и физико-химическим свойствам. Формирование разнообразия природных разновидностей почв и растительности при воздействии гидрогенного фактора свидетельствует о значительной напряженности биосферных процессов в аридных условиях. Большая экологическая напряженность и возрастающая плотность антропогенных воздействий ограничивают приспособительные реакции растений, что позволяет утверждать о преобразующей роли гидрогенной неоднородности на функциональные свойства почв (Залибеков, Новикова, 2016; Кондаков и др., 2022).

Литогенная неоднородность выявляется при анализе влияния почвообразующих пород на обособление границ ареалов почв. Природные варианты пустынных экосистем и их динамика определяются категориями отложений, выходящих на поверхность (глины, суглинки, пески) представленные в переработанном виде на поверхность геологических отложений. Более значительные изменения литогенной неоднородности формируются в условиях распространения движущихся песков, приуроченных к ареалам почв, используемых для выпаса скота. Выявленные неоднородности позволяют говорить об изменении границ и размера площадей функционирующих почв на высшей стадии деградации. Опустынивание и аридная деградация земель свойственная регионам Европейского юга России, сформирована в аналогичных условиях, характерных для Терско-Кумской низменности. Негативные последствия их отразились на состоянии травостоя пастбищ (видовом составе, проективном покрытии), охватывая более 80% территории. Это объясняется: во-первых, острой засушливостью климата и отсутствием возможностей для орошения; во-вторых, отсутствием нормированного процесса выпаса скота и чрезмерно высокой нагрузкой. Способы использования земель кормовых угодий за последние полвека характеризуются нарастанием нагрузок образуемых в основном за счет увеличения поголовья мелкого рогатого скота (Манаенков, 2014). Кроме того, большие изменения формируются в результате увеличения антропогенных нагрузок с последующим созданием производственных кооперативов и разных форм владения землей.

Особо следует упомянуть о влиянии антропогенного фактора, направленного на расширение площадей отчуждаемых земель с созданием новых для рассматриваемого региона отраслей. По статическим данным численность населения в регионе за последние 10 лет удвоилась, а площади занятые населенными пунктами расширились более чем в 1.5 раза. Примером значительного увеличения плотности технических объектов явились строительство железнодорожной линии Кизляр-Махачкала, протяженностью 90 км и расширения автомагистральных шоссе дорог. Зоны отчуждения, влияния техногенных объектов привели к вытеснению продуктивных сельскохозяйственных угодий на площади более 50 тыс. га. Построенные многочисленные технические объекты изменили общебиосферные условия, привели к дополнительному увеличению нагрузок на единицу площади и уменьшению продуктивных площадей почв. Ухудшение экологического состояния почвенного покрова пастбищ связано с падением урожайности травостоя, острым недостатком атмосферных осадков и часто повторяющимися засухами и суховеями (Залибеков, 2018).

Главная закономерность вытекающего из особенностей распространения пастбищных нагрузок – приуроченность максимальной плотности выпасаемого поголовья к участкам подверженным интенсивной деградации. В районах, где распространены очаги опустынивания (северно-западная часть Бажиганских песков), плотность выпасаемого поголовья достигает максимальных величин. В этом же регионе получили развитие и другие виды антропогенных воздействий: отчуждение земель для размещения объектов нефтегазодобывающей промышленности, добычи песка, строительных материалов и другие (Кулик, 2014). Динамика изменения физико-химических свойств почв, подверженных пустынной деградации под влиянием высоких пастбищных нагрузок, показывают, что нарастание величин нагрузок обратно пропорционально хозяйственной продуктивности пастбищных угодий (Горбов, Безуглова, 2022).

Пропорциональное соотношение нагрузок и поедаемой части травостоя отмечается в светло-каштановых карбонатных, лугово-каштановых и луговых почвах. Для остальных типов почв – луговых засоленных в разной степени, солончаков и бурых пустынных почв существенных различий для градации по степени засоления, эродированности, солонцеватости не выделяется. Рекомендуется их включить в группу низкопродуктивных почв кормовых угодий. Выявление форм воздействий и закономерностей, проявляющихся в различных типах почв, имеет определенное значение. Важность этого фактора в современных условиях рыночной экономики возрастает в связи с возникшей необходимостью определения адаптационных ресурсов повышения продуктивности деградированных земель (Ковда, 1977). Учитывая использование природных кормовых угодий с превышением оптимальных нагрузок, оценка адаптивной изменчивости почв осуществляется нормированием выпаса с учетом содержания гумуса, питательных веществ почв и видового разнообразия растений пастбищного травостоя (табл. 3).

Изменение оценочных показателей почв, показывает наличие широкого диапазона условий, обусловленных различиями в степени засушливости климата. Такая дифференциация проявляется в продолжительности и количестве засушливых дней в течение вегетационного периода.

Самым продолжительным периодом является градация засушливого климата с гидротермическим коэффициентом 0.2-0.4. Острозасушливый период характеризуется по продолжительности 26 дней. Общая продолжительность засушливого климата составляет 70-80 дней, охватывая подавляющую часть вегетационного периода растений. Оценка продуктивности растительных сообществ произведена по величине накопленной фитомассы за выделенные периоды вегетации. Оценочные факторы определены по показателям отдельных свойств: содержанию гумуса, питательных веществ и водопроходной почвенной структуры (Гунин, Панкова, 2016).

Большое значение имеет определение эффективных способов использования земель в зависимости от степени засушливости климата. Острозасушливыми, умеренно-засушливыми условиями характеризуются более 80% территории региона, где стабильно, устойчиво освоены в пастбищном хозяйстве (Неронов, 2012). Увлажненные условия, включая влажные, имеют островной характер распространения в ограниченных масштабах в прилегающих земельных участках к внутренним водоемам, орошаемым землям поверхностными и подземными пресными водами. Данные, характеризующие количество дождливых дней за вегетационный период, иллюстрируют широкий диапазон различий между выделенными градациями по количеству дождливых дней за 1 год. Климатические условия в разных географически удаленных участках региона зависят от положения широтно-зонального климатического пояса (Баламирзоев, Шахмирзоев, 2004). Аналогичный характер наблюдается и в распределении атмосферных осадков по отдельным районам, расположенным в Терско-Кумской низменности. Минимальное количество осадков (16 мм) за вегетационный период выпадает в острозасушливых условиях (Терекли Мектеб, Бажиганские пески), где формируются почвы подверженные в сильной степени опустынивания (Шумова, 2021). К югу, юго-востоку количество осадков увеличивается за вегетационный период растений (до 40-60 мм), где процессы аридной деградации сильной степени переходят к стадиям засушливого, умеренно-засушливого климата. В стадиях увлажнения ослабевают процессы аридизации, улучшается водный режим почв, где развитие наземных экосистем протекает в направлении остепнения, олуговения. Следует упомянуть об активной роли ветровой эрозии, являющейся одним из главных факторов, который определяет адаптивные показатели почв пастбищных экосистем. Максимальное количество дней с сильными ветрами отмечается в стадии острозасушливого климата, распространенного в

пределах Тереклинских и Бажиганских песков. Высшая стадия развития ветровой активности (<15 м/сек) в окрестностях населенных пунктов Кумли, Боранчи, Уйсалган силы ветров и пыльных бурь достигают 20-30 м/сек, повреждая посевы, дорожные объекты, жилые дома, хозяйственные и мелиоративные комплексы (Биарсланов, 2015).

**Таблица 3.** Изменения оценочных показателей почв сельскохозяйственных угодий по степени засушливости климата Терско-Кумской низменности.

Показатели	Степень засушливости климата					Примечание
	остро-засушливая	засушливая	умеренно-засушливая	увлажненная	влажная	
Продолжительность засушливого периода, в днях	26	30	18	20	17	–
Гидротермический коэффициент (ГТК)	<0.2	0.2-0.4	0.4-0.5	0.5-0.7	–	–
Типы почв	светлокаштановая, бурая полупустынная	светло-каштановая	каштановая, лугово-каштановая	темнокаштановая	темнокаштановая	–
Оценка продуктивности	0	112	203	305	40	учитывается хозяйственная продукция
Бонитировочная цена в руб.	0	104	185	400	400	учитывается хозяйственная продукция
Способы использования земель	пастбище	пастбище	пашня условно орошаемая	пашня орошаемая	поливные луга сенокосы	–
Количество дождливых дней за вегетационный период	8	14	25	28	31	средние показатели за 10 лет наблюдений
Сумма атмосферных осадков за вегетационный период	16	49	109	120	250	–
Число дней с сильными ветрами	75	70	44	33	19	–
Сумма температур > 10°C	3800	3820	3650	3600	3600	–
Использование подземных вод	10-летний период	5-10 лет	< 5 лет	–	–	сроки стабильного обеспечения
Обогащение видового разнообразия растений с коротким периодом вегетации	популяция кормовых растений	отдельные виды кормовых растений	фитомелиорация		–	–



Сумма активных температур ( $>10^{\circ}\text{C}$ ) на территории региона остается стабильной в пределах  $3500\text{-}4000^{\circ}\text{C}$ , указывая на теплообеспеченность сельскохозяйственных культур (Бананова, 1989). Потенциальные ресурсы аридных почв оцениваются по наличию возможностей использования подземных пресных вод и развития орошения. Использование подземных пресных вод в настоящее время ограничено из-за недостаточной обеспеченности материальной базы сельского хозяйства. Однако, перспективы применения подземных пресных вод в приморских равнинах определяются в значительном масштабе, что связано с относительно неглубоким залеганием запасов подземных пресных вод и их самовосстановительной способностью. Учитывая эти обстоятельства, мы представили научное обоснование о создании самостоятельного направления прикладных исследований «Мелиорация и подземные воды». Мобилизация нетрадиционных видов водных ресурсов и их рациональное использование связаны с восстановлением разнообразия кормовых растений и технологий их возделывания.

### Выводы

Динамика развития аридного климатического режима и возрастающая роль антропогенного фактора свидетельствуют о расширении, углублении значимости региональных аспектов адаптации систем использования почвенного покрова.

1. Выявление водных ресурсов исследованием нетрадиционных источников воды – запасов подземных пресных вод, залегающих на глубине 300-500 м. Резервы пресных незагрязненных подземных вод в пределах исследуемого района характеризуются самовосстановлением, стабильностью и высоким качественным составом.

2. Установлено, что влияние климатических рисков уменьшается с увеличением соотношения площадей почв гидроморфного режима. Максимальная величина ареалов функционирующих почв характерна для низкоплодородных почв (светлокаштановых, бурых пустынных, солончаков типичных). Эти показатели выступают в качестве факторов уменьшения риска засушливых климатических условий. Биосферная роль низкоплодородных почв сохраняется из-за ограниченности вмешательства человека в острозасушливых условиях.

3. Для раскрытия механизма распределения и взаимодействия биосферных категорий почв, введено понятие «деградационного градиента». Суть его сводится к описанию нарушенного равновесия между ареалами, перешедшими в техносферу (объекты индустрии и городского хозяйства) и сохранившимися продуктивными площадями почвенного покрова. В результате изменения состава почв и расширения нарушенной их части формируются признаки ландшафтной неоднородности.

4. Выявленные неоднородности (климатические, гидрогенные, литогенные) характеризуются накоплением органического вещества почв, с дифференциацией степени влияния факторов почвообразования, включая процессы опустынивания, аридизации. Ведущее значение литогенной неоднородности связано с формированием ареалов движущихся песков, формированием эрозионного рельефа, засыпкой, погребением объектов жилищного, промышленного, дорожного строительства.

5. Оценка адаптивной изменчивости деградированных земель, климатических элементов, возможностей применения подземных пресных вод, раскрывают перспективы освоения аридных земель в народном хозяйстве. Эти показатели представляют основу для определения региональных факторов адаптации аридных земель в современных условиях климатического потепления.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУНД ФЕНЙ РД по теме № НИР: 122021800247-5 (FNMN-2022-0010) «Совершенствование адаптивно-ландшафтной системы земледелия на основе разработки новых ресурсосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур и агроэкологической оценки земель. Совершенствование организационно-экономического механизма повышения эффективности сельскохозяйственного производства Республики Дагестан».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адаптация почвенных животных к условиям среды. 1977 / Ред. М.М. Гиляров. М.: Наука. 191 с.  
Бабаев Л.Г. 1989. Историко-географический анализ динамики пустынных экосистем // Проблемы освоения пустынь. № 5. С. 18-25.

- Бананова В.А.* 1989. Методы изучения очагов опустынивания на пастбищах Западного прикаспия // Проблемы освоения пустынь. № 5. С. 56-61.
- Баламирзоев М.А., Шахмирзоев Р.А.* 2004. Критерии бонитировки почв Западного прикаспия // Почвенные и биологические ресурсы южных регионов России. Махачкала: ПИБР ДНЦ РАН. С. 87-94.
- Биарсланов А.Б.* 2015. О применении ГИС – технологий в мониторинге почвенных ресурсов Терско-Кумской низменности // Труды молодых ученых БФ ДГУ. Вып. I. Махачкала. С. 14-20.
- Горбов С.Н., Безуглова О.С.* 2022. Органическое вещество в почвах Ростовской агломерации // Почвоведение. № 7. С. 894-909.
- Гунин П.Д., Панкова Е.И.* 2016. История формирования и основные понятия концепции опустынивания в отечественной науке. Природные и антропогенные изменения аридных экосистем и борьба с опустыниванием // Труды Института геологии ДНЦ РАН. С. 15-20.
- Залибеков З.Г.* 1995. Опыт экологического анализа почвенного покрова Дагестана // Дагестанский научный центр, Прикаспийский институт биоресурсов. 146 с.
- Залибеков З.Г.* 1996. Роль экотонов в формировании биологического разнообразия в аридных зонах // Аридные экосистемы. № 2-3. С. 26-32.
- Залибеков З.Г.* 2018. О закономерностях формирования продукционных ресурсов засоленных почв Терско-Кумской низменности // Аридные экосистемы. № 2. С. 3-10. [Zalibekov Z.G. Regularities of the Formation of Production Resources on Saline Soils of the Terek-Kuma Lowland // Arid Ecosystems. Vol. 08. No. 2. P. 83-88.].
- Залибеков З.Г., Новикова Н.М.* 2016. Научные и прикладные основы планетарной борьбы с опустыниванием // Природные и антропогенные изменения аридных экосистем и борьба с опустыниванием. Махачкала: ИГ ДНЦ РАН. С. 5-14.
- Ковда В.А.* 1977. Аридизация суши и борьба с засухой. М.: Наука. 272 с.
- Кондаков В.М., Газалиев И.М., Курбанова Л.М., Курбанисмаилова А.С., Гусейнова А.Ш.* 2022. Прогнозно-эксплуатационные ресурсы подземных вод // Аридные экосистемы. № 2. С. 94-101. [Kondakov V.M., Gazaliev I.M., Kurbanova L.M., Kurbanismailova A.S., Huseynov A.Sh. Projected Exploitable Groundwater Resources in the Dagestan Piedmonts // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 2. P. 200-207.].
- Кулик К.Н.* 2014. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград. ВНИАЛМИ. 248 с.
- Манаенков А.С.* Лесомелиорация арен засушливой зоны. Волгоград. ВНИАЛМИ. 2014. 420 с.
- Неронов В.В.* 2012. Полевая практика по геоботанике в средней полосе Европейской России. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы. 176 с.
- Шумова Н.А.* 2021. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в республике Калмыкия // Аридные экосистемы. № 4. С. 11-24. [Shumova N.A. 2021. Quantitative Climate Indicators Applied to the Assessment of Hydrothermal Conditions in the Republic of Kalmykia // Arid Ecosystems. Vol. 11. No. 4. P. 327-335.].

УДК 504.53

**СВОЙСТВА ПОЧВ И ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ  
АРИДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПОБЕРЕЖЬЯ ОАЗИСА В ЮГО-ВОСТОЧНОМ ТУНИСЕ**

© 2023 г. Б. Абделхаким\*, О. Зохра\*, Е. Виссем\*, Б. Надхем\*\*

*\*Университет Габеса, научный факультет*

*Тунисская Республика, 6072, г. Габес, район Эрриад, Зриг. E-mail: bouajilaabdelhakim@gmail.com*

*\*\*Тунисский университет Эль Манара, факультет наук Туниса*

*Тунисская Республика, 2092, г. Тунис, кампус Фархат Хачед*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 10.01.2023. Принята к публикации 13.01.2023.

Знания о свойствах почв и запасах органического углерода в них в условиях аридных экосистем крайне важны для оптимизации связывания углерода с целью смягчить последствия климатических изменений. Наше исследование направлено на изучение свойств почвы, пулов и запасов почвенного органического углерода в аридной экосистеме оазиса. Почвенные образцы были отобраны случайным образом с глубин 0-5 и 0-30 см на 17 участках (всего 34 образца). В них мы измерили объемную плотность, pH, электропроводность, содержание карбоната кальция и гипса. Также мы определили общий объем почвенного углерода, частицы органического углерода, а также наличие углерода, связанного с концентрациями в почве мелких минеральных включений и запасов. Результаты показали высокие значения pH и электропроводности оазисных почв. Аналогичным образом на исследованных участках мы зафиксировали высокое количество CaCO<sub>3</sub> и гипса. Значения объемной плотности колебались от 1.23 до 1.30 г/см<sup>3</sup> на глубине 0-5 см и от 1.18 до 1.35 г/см<sup>3</sup> на глубине 0-30 см. Общие концентрации углерода в среднем колебались от 8.47 до 13.25 г/кг и от 9.27 до 11.06 г/кг по двум слоям соответственно. Неразлагаемый углерод образовывал пулы по всех слоях (> 60%). Запасы углерода на участках в слое 0-5 см составили 0.4-0.8 кгС/м<sup>2</sup>, а в слое 0-30 см достигали 4 кгС/м<sup>2</sup> (40 т/га). Запасы твердых частиц органического углерода составили 21-34%. Матрица корреляции для свойств почвы показала значительную отрицательную корреляцию (p = 0.05) между частицами углерода и электропроводностью. Однако запасы углерода сильно и положительно коррелируют (p = 0.01) с углеродными пулами. Таким образом, можно утверждать, что почвы оазиса содержат в себе относительно большое количество органического углерода. А значит, данное исследование подтверждает, что аридные почвы Северной Африки можно рассматривать как потенциальный поглотитель для связывания и удержания органического углерода.

*Ключевые слова:* органический углерод, гипсоносные почвы, аридные регионы, Тунис.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-53-66**

**EDN: LOEVRN**

Органический углерод в почвах играет важную роль в круговороте углерода в наземных экосистемах в целом (Yigini, Panagos, 2016). Однако его динамика в почвах зависит от климатических изменений, а также изменения растительного покрова или режимов землепользования. J. Albaladejo с соавторами (2013) указывали, что четкое описание распределения и трансформации органического углерода и влияющих на него факторов поможет предсказать последствия климатических изменений. В полуаридных и аридных регионах углерод крайне чувствителен к изменениям окружающей среды, особенно растительного покрова (Wang et al., 2011), и его содержание составляет < 0.5% (Lal, 2002). Более того, эти экосистемы сталкиваются с такими экологическими угрозами, как снижение органических веществ в почвах, засоление, эрозия и опустынивание (Brahim et al., 2021), снижающие плодородие почв и их способность накапливать углерод.

В последние годы все больше внимания уделяют проблеме круговорота органического углерода в почвах и изоляции в них органических пулов. Органический углерод является основным компонентом глобального углеродного цикла (Munoz-Rojas et al., 2012), поскольку действует как

источник или поглотитель диоксида углерода из атмосферы. Улучшение способов для изоляции углерода в почве и сокращение его выбросов – это основные стратегии, необходимые для контроля концентрации парниковых газов в атмосфере. Именно поэтому странам всего мира следует регулярно отчитываться о запасах органического углерода в почвах (Brahim et al., 2014), а также информировать о текущих запасах углерода в целом. Также изменения необходимы в Рамочной конвенции ООН об изменении климата (United Nations Framework Convention for Climate Change – UNFCCC; Batjes, 2002). Кроме того, в соответствии с UNFCCC, страны должны предоставлять кадастры выбросов и поглотителей парниковых газов, а в контексте сельского и лесного хозяйств – оценки запасов углерода в почве (Batjes, 2002). Для получения точных оценок требуется высокая плотность точек, где проводится отбор почвенных проб (Liebens, van Molle, 2003), потому что, как показали некоторые исследования, углеродные запасы сильно зависят от типа землепользования, свойств и типов почв (Pandey et al., 2010), а значит, важно изучать влияние землепользования и типов почв в различных условиях окружающей среды на изоляцию углерода, и особенно – в почвах аридных регионов.

Несколько исследований показали, что аридные почвы, превращенные в сельскохозяйственные угодья и в оазисные территории, могут накапливать довольно большие запасы органического углерода в аридном климате: например, почвы континентального оазиса Кебели в Тунисе (Omar et al., 2017). P. Mlih с соавторами (2019) показали, что концентрация углерода в почвах оазиса Шенини в Габесе выше, чем в соседних некультивируемых почвах. Согласно С. Li с соавторами (2019), после многолетней мелиорации формирование оазисов привело к увеличению содержания органического углерода и питательных веществ в почвах по сравнению с таковым в соседней пустыне. H. Elbasiouny с соавторами (2017) доказали, что использование для сельского хозяйства прибрежных земель в северной части дельты р. Нил гораздо лучше изолирует углерод и азот в почве. Авторы считают, что это может стать верным подходом для дальнейшего смягчения последствий климатических изменений. В недавней своей работе E. Xu с соавторами (2020) показали, что аридный регион Северо-Западного Китая может быть потенциальным поглотителем почвенного углерода. Пустынный оазис – это микроклимат, где уровень влажности, тепла и света благоприятен для оптимального выращивания в регионе с нехваткой плодородных почв таких культур, как апельсин, гранаты, овощи, кормовые культуры и злаки (Mlih et al., 2016). Превращение аридных земель в оазисы может играть большую роль для экосистем за счет развития сельского хозяйства (Zhang et al., 2017).

Прибрежный оазис в Габесе представляет собой особую аридную экосистему, которая играет большую роль в обеспечении продовольствием местного населения и увеличении природных ресурсов аридных почв. Стабильный контроль таких оазисов исключительно важен для экономического развития и социального благосостояния региона, а также для экологии в контексте климатических изменений. Наше исследование направлено на то, чтобы подчеркнуть важность сохранения прибрежных сельскохозяйственных систем в оазисе на юге Туниса, т.к. это необходимо для улучшения связывания органического углерода в аридных почвах. А потому мы поощряем правительство развивать и продвигать сельскохозяйственную деятельность для обеспечения устойчивой продовольственной безопасности, биоразнообразия и ресурсов.

### Материалы и методы

*Территория исследования.* Работа проводилась на побережье оазиса в Габесе, на юго-востоке Тунисской Республики (рис. 1). Климат в этом регионе сухой средиземноморский, особенно жаркий летом и мягкий зимой. Средние годовые осадки составляют 185 мм, а средняя годовая температура – 22.5°C, индекс аридности – 0.12 (UNEP, 1997). Финиковая пальма (*Phoenix dactylifera* L.) является доминирующим древесным видом этого оазиса, однако помимо нее здесь произрастают такие фруктовые деревья, как гранат (*Punica granatum* L.), фига (*Ficus carica* L.), виноград (*Vitis* spp.) и садовые культуры. Почвы в отобранных образцах (Pouget, 1965) оказались гипсоносными и были проклассифицированы как цементированные карбонатные (Petric Calcisols), цементированные гипсовые (Petric Gypsisols), гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks) и насыщенные слаборазвитые (Eutric Regosols) почвы (IUSS ..., 2015). Образцы были взяты с глубин 0-5 и 0-30 см, высушены на воздухе и просеяны через сито с ячейками размером 2 мм.

*Анализ почвенных свойств.* В насыщенной вытяжке (McLean, 1982) и почвенной пасте, насыщенной водой, мы измерили pH и электропроводность почв. Содержание карбонатов оценивали

кальциметром (Nelson, 1982), содержание гипса определяли, обрабатывая образцы карбонатом аммония и осаждением хлоридом бария (Vieillefon, 1979). Гранулометрический состав почв не оценивали, потому что до сих пор не разработан метод, который можно было бы использовать для точной оценки распределения частиц по размерам, а также для классификации гипсоносных почв по текстуре для верной интерпретации физических реакций, а большинство лабораторных методов включает предварительную обработку, которая удаляет гипс из образцов. Поэтому результаты распределения частиц по размерам не отражают распределения по размерам всей почвы (Suliman, Sallam, 2016). Мы использовали метод цилиндрического керна для определения объемной плотности, которая вычисляется по следующей формуле: масса сухого грунта/объем цилиндра.

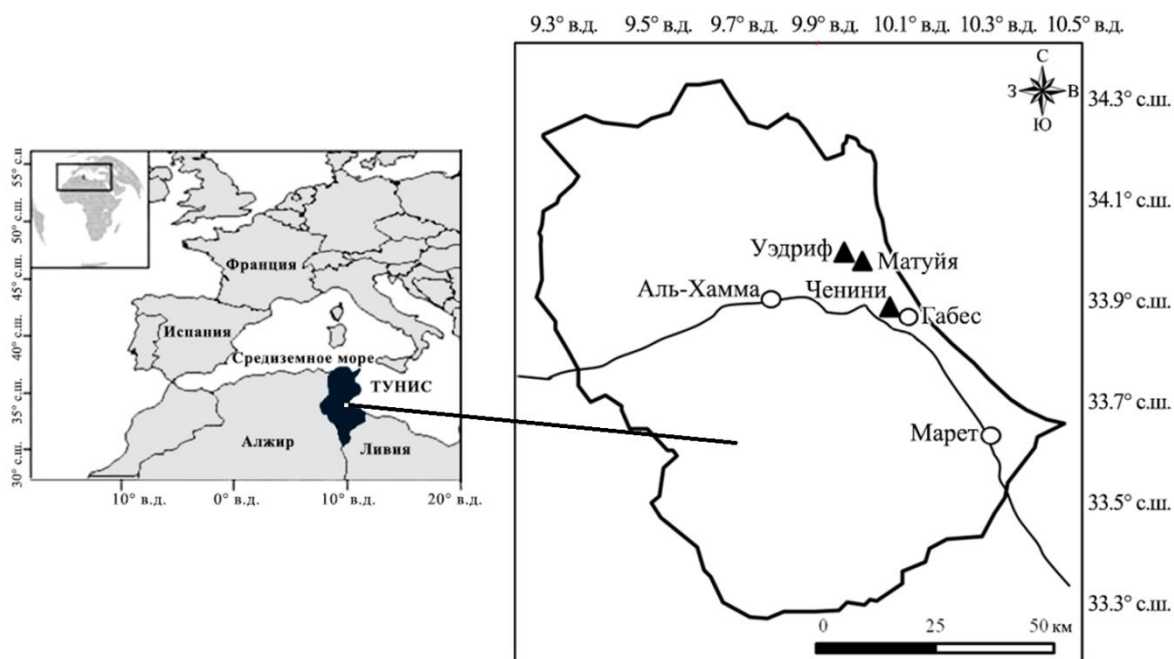


Рис. 1. Расположение изучаемого региона и площадок.

Метод окисления  $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$  Уолкли-Блэка (Nelson, Sommers, 1982) использован для измерения органического углерода в почвах. Твердые частицы углерода определяли с помощью метода Камбарделлы-Эллиота (Cambardella, Elliot, 1992), который заключается в диспергировании почвы в гексаметафосфате натрия в концентрации 5 г/л и отделении твердых частиц от почвы путем просеивания. Затем массу пропускают через сито с ячейками в 53 мкм, а взвесь сушат и анализируют на наличие органического углерода. Значения твердых частиц выражены для насыпного грунта; они оцениваются в массе, оставшейся в сите, а затем пересчитываются в г/кг в насыпном грунте. Согласно недавним исследованиям, общее количество органического углерода в почве – это сумма различных пропорций органических почвенных фракций (Wiesmeier et al., 2014). В почвах Туниса за счет мелкодисперсных минеральных включений преобладают органический углерод и его твердые частицы (Bouajila, Gallali, 2010). Следовательно, если принять во внимание крупнозернистость (крупные обломки, в гранулометрическом составе которых преобладает (77-88%) мелкий и очень мелкий песок) и крайне низкое содержание почвенных макро- и микроагрегатов в исследованных почвах, неразлагаемый органический углерод должен оцениваться по следующей формуле: неразлагаемый органический углерод = сумма органического углерода – твердые частицы органического углерода (все выражено в г/кг).

Запасы органического углерода в почве для определенной глубины мы оценивали по следующей формуле (Brahim et al., 2014; Yigini, Panagos, 2016): запасы органического углерода (тС/га или  $kgC/m^2$ ) = содержание углерода (%) · объемная плотность ( $г/см^3$ ) · глубина (см).

*Статистический анализ.* Мы провели различные статистические тесты и анализ основных компонентов, чтобы изучить взаимосвязь между почвенными свойствами, углеродными пулами и

запасами в районе исследования, в частности, с помощью корреляций Пирсона ( $P = 0.01$ ,  $P = 0.05$ ). Статистические тесты выполнялись с использованием приложения XLSTAT для Excel.

### Результаты и обсуждение

*Свойства почв* в экосистемах оазиса очень похожи на свойства почв в регионе в целом. В отобранных образцах самое высокое среднее значение pH наблюдалось для насыщенных слаборазвитых почв (Eutric Regosols) –  $8.83 \pm 0.15$  на глубинах 0-5 и 0-30 см. Однако в цементированных карбонатных (Petric Calcisols), цементированных гипсовых (Petric Gypsisols) и гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks) pH сильно варьировал в обоих слоях. Коэффициенты вариации оказались очень низкими и не превышали 10% (табл. 1, 2).

В слое глубиной 0-5 см средние значения электропроводности составили для разных типов почв  $7.87 \pm 5.77$ ,  $15.71 \pm 6.67$ ,  $6.27 \pm 1.83$  и  $4.43 \pm 1.16$  мС/см соответственно. Однако в слое 0-30 см самые высокие значения ( $23.91 \pm 19.56$  мС/см) наблюдались только для солончаков, тогда как в почвах других типов она не превышала 12 мС/см. Коэффициент вариации для электропроводности оказался особенно высоким в слое 0-5 см – 30-82%. Объемная плотность в среднем варьировала от  $1.16 \pm 0.10$  до  $1.30 \pm 0.17$  г/см<sup>3</sup> в слое 0-5 см и от  $1.18 \pm 0.11$  до  $1.35 \pm 0.07$  г/см<sup>3</sup> в слое 0-30 см. Коэффициент вариации для объемной плотности был очень низким для всех типов почв и слоев и не превышал 14%. Содержание карбоната кальция варьировало от 62 до 113 г/кг в слое 0-5 см и от 67 до 105 г/кг в слое 0-30 см. Самая высокая концентрация CaCO<sub>3</sub> – в насыщенных слаборазвитых почвах (Eutric Regosols) в слое 0-5 см и в гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks) в слое 0-30 см. Содержание гипса также сильно менялось в разных почвах и слоях: в верхнем 5-сантиметровом оно варьировало от 51.33 до 275 г/кг, в 30-сантиметровом – от 59.33 до 291.3 г/кг (табл. 1, 2). Самое высокое содержание гипса на глубине 0-5 см (275.18 г/кг) и 0-30 см (291.3 г/кг) – в цементированных гипсовых почвах (Petric Gypsisols), а в насыщенных слаборазвитых (Eutric Regosols), наоборот, наименьшее. Коэффициент вариации был высоким как для карбоната кальция, так и для гипса (табл. 1, 2).

В целом, можно утверждать, что в оазисных экосистемах Габеса почвы щелочные, засоленные, с высоким содержанием гипса и карбоната кальция. Как и в работе J.L. Smith и J.W. Doran (1996), цементированные карбонатные (Petric Calcisols) и насыщенные слаборазвитые (Eutric Regosols) почвы оказались умеренно засоленными ( $4 \text{ дС/м} < \text{электропроводность} < 8 \text{ дС/м}$ ), цементированные гипсовые (Petric Gypsisols) – сильно засоленными ( $8 \text{ дС/м} < \text{электропроводность} < 16 \text{ дС/м}$ ), а гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks) – очень сильно засоленными (электропроводность  $> 16 \text{ дС/м}$ ).

*Концентрации пулов органического углерода в почвах.* Результаты исследований показали (табл. 3), что в среднем у цементированных гипсовых почв (Petric Gypsisols) – самое высокое содержание органического углерода ( $13.25 \pm 1.4$  г/кг), в то время как самое низкое ( $8.47 \pm 4.65$  г/кг) было обнаружено у насыщенных слаборазвитых почв (Eutric Regosols); коэффициент вариации варьировал от 10% до 54%. Однако в слое 0-30 см концентрации запасов углерода составили  $9.27 \pm 2.1$  и  $11.06 \pm 4.53$  г/кг соответственно. Значения содержания углерода в почвах показали высокое непостоянство (коэффициент вариации  $> 20\%$ ), возможно, по причине разных химических и физических факторов в составе органического вещества на поверхности почвы. Как показано в таблице 3, самая высокая средняя концентрация твердых частиц углерода в слое 0-5 см наблюдалась в цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols), где она составила  $3.38 \pm 1.91$  г/кг, с чуть более низким значением у цементированных гипсовых почв (Petric Gypsisols) –  $2.87 \pm 1.14$  г/кг при коэффициенте вариации  $> 39\%$ .

Однако на глубине 0-30 см концентрация твердых частиц органического углерода составила  $2.1-33.6$  г/кг с коэффициентом вариации 31-55%. Как и органический углерод, содержание его твердых частиц сильно варьировало для каждого типа почвы как в обоих слоях. Неразлагаемый углерод был назван «рекальцитрантным пулом» общего органического углерода в почве (Hassink et al., 1997), потому что он зависит от таких мелких включений, как глина и известь. Неразлагаемые концентрации в слое 0-5 см располагались в следующем порядке: цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)  $>$  цементированные карбонатные почвы (Petric Calcisols)  $>$  насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)  $>$  гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks). Наибольшее зарегистрированное значение неразлагаемого углерода –  $10.38 \pm 1.39$  г/кг (табл. 3). В слое 0-30 см значения мало различались между типами почв и составили от  $6.97 \pm 1.05$  до  $8.34 \pm 3.47$  г/кг.

Коэффициент вариации неразлагаемого углерода сильно различался между типами почв, варьируя от 13 до 59%.

**Таблица 1.** Проанализированные свойства почв в изучаемом регионе: pH, электропроводность, объемная плотность, содержание гипса и карбоната кальция в слое 0-5 см.

Площадки отбора проб	Координаты площадок отбора проб	pH	Электропроводность, мС/см	Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	Гипс, г/кг	CaCO <sub>3</sub> , г/кг
<b>Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)</b>						
S1	33° 51' 53.88" с.ш., 10° 04' 10.10" в.д.	7.62	4.58	1.27	18.70	105.90
S2	33° 53' 53.66" с.ш., 10° 03' 37.22" в.д.	7.75	3.76	1.21	228.30	59.30
S3	33° 53' 51.90" с.ш., 10° 04' 9.73" в.д.	7.86	8.98	1.13	365.00	80.50
S4	33° 58' 09.24" с.ш., 10° 00' 42.61" в.д.	8.30	4.54	1.26	132.80	72.00
S5	33° 57' 54.66" с.ш., 10° 01' 28.60" в.д.	9.48	17.51	1.34	333.90	8.40
Среднее значение		8.20	07.87	1.24	215.74	65.22
Стандартное отклонение		0.76	5.77	0.08	143.27	36.05
Коэффициент уплотнения, %		9.25	73.22	6.27	66.41	55.27
<b>Цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)</b>						
S1	33° 57' 42.86" с.ш., 10° 03' 31.16" в.д.	7.80	6.53	1.32	227.30	110.10
S2	33° 57' 54.00" с.ш., 10° 00' 35.88" в.д.	9.16	21.6	1.52	241.30	51.50
S3	33° 57' 56.79" с.ш., 09° 59' 54.20" в.д.	9.09	15.22	1.27	395.00	31.70
S4	33° 57' 59.02" с.ш., 09° 59' 31.17" в.д.	8.40	19.48	1.10	237.10	55.50
Среднее значение		8.61	15.71	1.30	275.18	62.20
Стандартное отклонение		0.64	6.67	0.17	80.10	33.59
Коэффициент вариации, %		7.44	42.45	13.27	29.11	54.00
<b>Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)</b>						
S1	33° 53' 0.69" с.ш., 10° 04' 12.34" в.д.	8.92	7.95	1.07	188.9	67.7
S2	33° 53' 43.47" с.ш., 10° 04' 53.13" в.д.	8.03	6.42	1.31	65.6	241.5
S3	33° 53' 46.19" с.ш., 10° 03' 48.18" в.д.	7.75	3.51	1.1	564.5	33.8
S4	33° 57' 17.80" с.ш., 10° 02' 26.72" в.д.	7.81	5.62	1.2	180	80.5
S5	33° 57' 23.01" с.ш., 10° 02' 35.18" в.д.	8.05	7.85	1.13	145.3	144
Среднее значение		8.11	6.27	1.16	228.86	113.50
Стандартное отклонение		0.47	1.83	0.10	193.83	81.93
Коэффициент вариации, %		5.80	29.17	8.24	84.69	72.19
<b>Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)</b>						
S1	33° 52' 59.14" с.ш., 10° 04' 45.78" в.д.	8.81	4.33	1.17	24.30	161.00
S2	33° 57' 49.38" с.ш., 10° 01' 09.52" в.д.	8.49	3.33	1.30	89.20	93.20
S3	33° 57' 16.47" с.ш., 10° 02' 16.81" в.д.	9.09	5.64	1.21	40.50	55.00
Среднее значение		8.80	4.43	1.23	51.33	103.07
Стандартное отклонение		0.30	1.16	0.07	33.78	53.68
Коэффициент вариации, %		3.41	26.13	5.43	65.80	52.09

*Общие запасы органического углерода, твердых частиц и неразлагаемого углерода в почвах.* Результаты нашего исследования показали, что в среднем запасы в почве в слое 0-5 см колебались от 0.49 до 0.87 кгС/м<sup>2</sup> (или от 4.9 до 8.7 т/га; рис. 2). В цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols) углеродные запасы оказались самыми высокими. В слое 0-30 см цементированных гипсовых (Petric Gypsisols), насыщенных слаборазвитых (Eutric Regosols) и цементированных карбонатных (Petric Calcisols) почв и гипсовых солончаков (Gypsic Solonchaks) содержание твердых частиц углерода оказалось более низким: 3.58, 3.75, 3.90 и 4.01 кгС/м<sup>2</sup> соответственно (рис. 3). Запасы твердых частиц (без запасов неразлагаемого органического углерода) не превышали 0.20 кгС/м<sup>2</sup>

в слое 0-5 см и колебались между 0.8 и 1.3 кгС/м<sup>2</sup> в слое 0-30 см. У цементированных карбонатных почв (Petric Calcisols) в слое 0-30 см оказался самый высокий запас твердых частиц.

**Таблица 2.** Проанализированные свойства почв в изучаемом регионе: рН, электропроводность, объемная плотность, содержание гипса и карбоната кальция в слое 0-30 см.

Площадки отбора проб	рН	Электропроводность, мС/см	Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	Гипс, г/кг	CaCO <sub>3</sub> , г/кг
<b>Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)</b>					
S1	7.56	3.35	1.32	25.80	118.60
S2	7.72	8.68	1.02	178.50	63.50
S3	7.84	4.02	1.12	385.00	59.30
S4	9.22	5.37	1.28	107.70	80.50
S5	9.23	12.18	1.45	271.50	16.90
Среднее значение	8.31	6.72	1.24	193.70	67.76
Стандартное отклонение	0.84	3.68	0.17	140.06	36.82
Коэффициент вариации, %	10.07	54.738	13.69	72.31	54.34
<b>Цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)</b>					
S1	7.92	18.58	1.27	247.50	122.80
S2	9.28	10.79	1.40	227.20	67.40
S3	8.77	10.03	1.26	451.60	35.70
S4	8.47	11.61	1.21	239.10	55.50
Среднее значение	8.61	12.75	1.29	291.35	70.35
Стандартное отклонение	0.57	3.94	0.08	107.16	37.33
Коэффициент вариации, %	6.60	30.882	6.31	36.78	53.06
<b>Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)</b>					
S1	8.85	58.6	1.24	233.90	67.70
S2	8.03	18.45	1.02	143.90	228.80
S3	7.77	11.28	1.30	423.60	46.60
S4	7.72	15.14	1.23	178.50	59.30
S5	8.72	16.09	1.12	162.30	127.10
Среднее значение	8.22	23.91	1.18	228.44	105.90
Стандартное отклонение	0.53	19.56	0.11	114.16	75.33
Коэффициент вариации, %	6.48	81.81	9.43	49.98	71.14
<b>Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)</b>					
S1	8.90	13.24	1.41	22.80	152.50
S2	8.66	3.14	1.27	125.00	55.00
S3	8.94	9.2	1.36	30.20	50.80
Среднее значение	8.83	8.53	1.35	59.33	86.10
Стандартное отклонение	0.15	5.08	0.07	56.99	57.54
Коэффициент вариации, %	1.71	59.619	5.27	96.05	66.83

*Почвенные свойства оазисных экосистем.* Значения рН показали, что почвы исследуемого района – щелочные. Сходные значения рН были установлены R. Mlih с соавторами (2019) и Z. Омар с соавторами (2020) в тех же регионах, что можно объяснить высоким содержанием солей, которые выделяются гипсовой коркой, привносятся при поливе соленой водой и при подъеме уровня грунтовых вод (Boulbaba et al., 2012). В почвах Австралии наличие гипса может снижать рН примерно до 8 на любых глубинах, как было показано, например, в исследовании V.N.L. Wong с соавторами (2009), а также может увеличивать электропроводность (Bouksila et al., 2013). Наши данные по электропроводности согласуются с данными, полученными Z. Haj-Amor с соавторами (2017) и Z. Омар с коллегами (2017). Высокая электропроводность также может быть



результатом использования соленой воды для орошения (от 2.5 до 4 г/л) и испарения почвенной влаги, что приводит к накоплению солей и, соответственно, последующему увеличению электропроводности. Более того, по данным Н.Т. Fourati с соавторами (2015), самая высокая степень засоления была обнаружена в прибрежной зоне Габеса в связи с ее затоплением морской водой.

**Таблица 3.** Органический почвенный углерод, твердые частицы углерода и неразлагаемый углерод в двух слоях для разных типов почв.

Площадки отбора проб	Органический почвенный углерод, г/кг	Твердые частицы углерода, г/кг	Неразлагаемый углерод, г/кг	Органический почвенный углерод, г/кг	Твердые частицы углерода, г/кг	Неразлагаемый углерод, г/кг
<b>Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	19.4	5.97	13.42	14.70	5.62	9.08
S2	11.2	2.57	8.62	10.30	3.33	6.97
S3	14.6	4.01	10.58	11.00	3.48	7.52
S4	11.8	3.53	8.27	12.40	4.47	7.93
S5	8.1	0.79	7.31	4.80	0.92	3.88
Среднее значение	13.02	3.38	9.64	10.64	3.56	7.08
Стандартное отклонение	4.25	1.91	2.43	3.67	1.74	1.95
Коэффициент вариации	32.63	56.41	25.16	34.51	48.85	27.50
<b>Цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	13.40	4.18	9.22	8.40	2.65	5.75
S2	14.60	2.25	12.35	7.20	2.26	4.94
S3	13.70	3.40	10.30	11.90	2.36	9.54
S4	11.30	1.65	9.65	9.90	1.15	8.75
Среднее значение	13.25	2.87	10.38	9.35	2.10	7.25
Стандартное отклонение	1.40	1.14	1.39	2.03	0.66	2.24
Коэффициент вариации	10.54	39.53	13.36	21.68	31.15	30.92
<b>Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	15.00	3.62	11.38	9.40	1.38	8.02
S2	7.40	3.48	3.92	3.80	1.79	2.01
S3	6.50	1.00	5.50	14.40	3.18	11.22
S4	6.90	1.66	5.24	13.70	3.10	10.60
S5	6.90	2.50	4.40	14.00	4.13	9.87
Среднее значение	8.54	2.45	6.09	11.06	2.72	8.34
Стандартное отклонение	3.63	1.13	3.03	4.53	1.12	3.74
Коэффициент вариации	42.45	46.21	49.74	41.00	41.10	44.83
<b>Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	13.10	3.14	9.96	11.30	3.12	8.18
S2	8.50	2.31	6.19	9.40	2.91	6.49
S3	3.80	1.18	2.62	7.10	0.86	6.24
Среднее значение	8.47	2.21	6.25	9.27	2.30	6.97
Стандартное отклонение	4.65	0.99	3.67	2.10	1.25	1.05
Коэффициент вариации	54.92	44.56	58.66	22.70	54.51	15.12

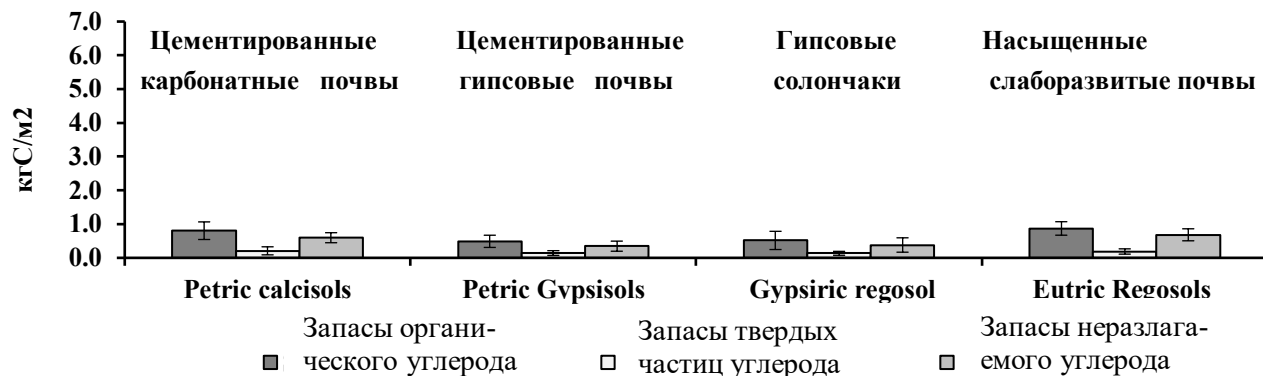


Рис. 2. Запасы органического углерода (в кгС/м<sup>2</sup>) в слое 0-5 см в разных типах почв.

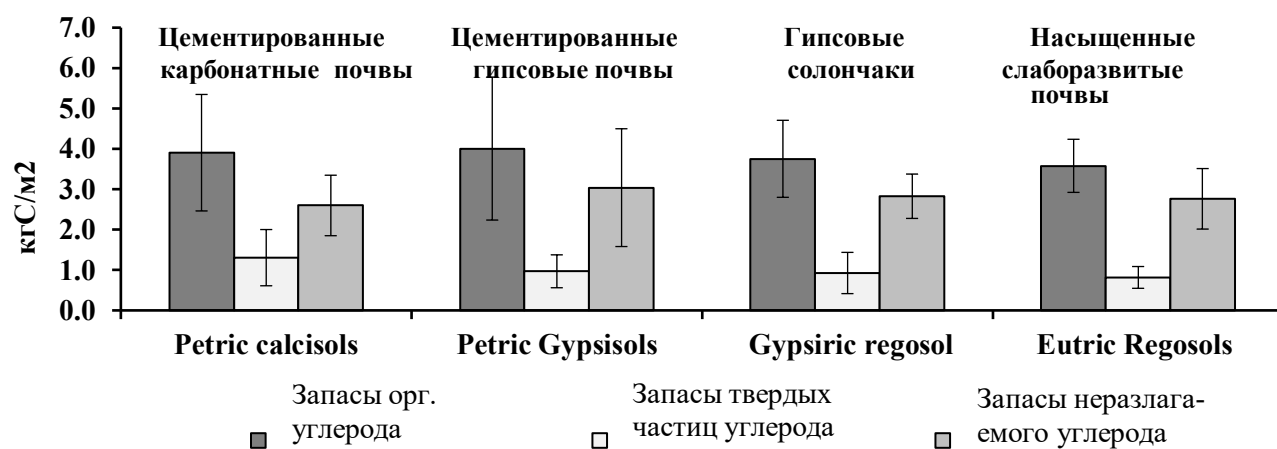


Рис. 3. Запасы органического углерода (в кгС/м<sup>2</sup>) в слое 0-30 см в разных типах почв.

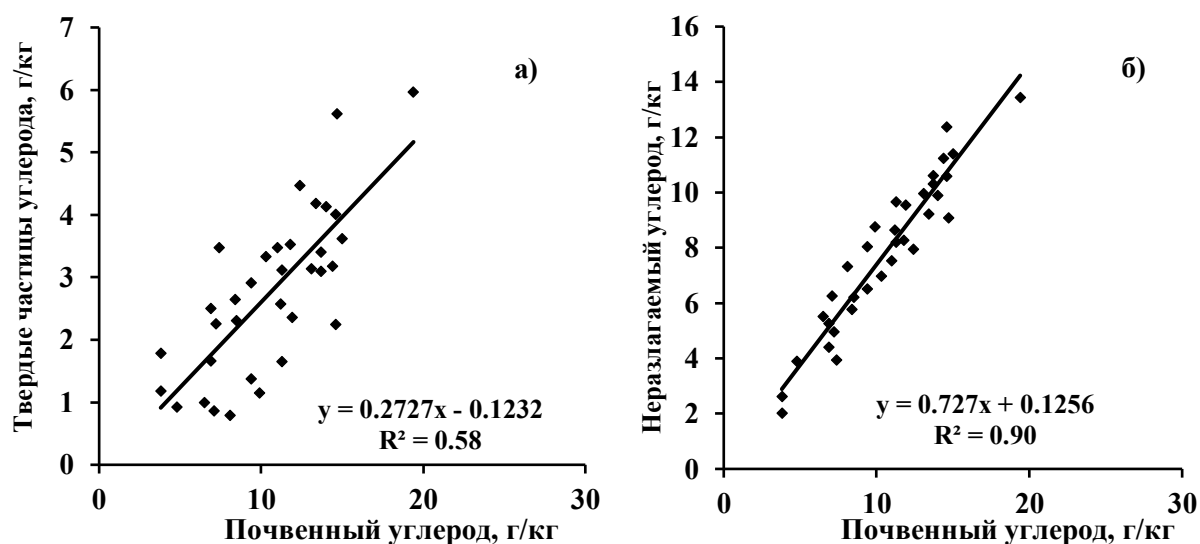
Наши исследования показали низкие значения объемной плотности, аналогичные значениям, которые были получены для почв южной Испании в работе J.D.R. Sinoga с соавторами (2012) и для гипсоносной почвы оазиса аридного Туниса (Haj-Amor et al., 2017; Mlih, 2015). Однако наши результаты расходятся с данными нескольких работ по аридным почвам Австралии (Setia et al., 2011; Wong et al., 2009). Такие относительно низкие значения объемной плотности объясняются, в частности, наличием свежих органических остатков и корней. Кроме того, R. Mlih (2015) зафиксировал более высокие значения объемной плотности (1.7 г/см<sup>3</sup>) в прилегающей гипсоносной почве и значения, похожие на наши, в почвах оазиса Шенини. По мнению M. Amin с соавторами (2014), объемная плотность зависит от типа землепользования и почвенных свойств.

*Концентрации запасов органического углерода в почве.* По данным M. Munoz-Rojas с соавторами (2012), большая концентрация запасов органического углерода была обнаружена в слое 0-40 см аридного региона Испании. А значит, методы связывания почвенного углерода должны сфокусироваться на углероде, расположенном глубоко в почвенных недрах, особенно если речь идет об аридных регионах. В целом, наши результаты согласуются с результатами R. Mlih (2015) для того же региона. Наши значения запасов углерода в солончаках и слаборазвитых почвах (Regosols) оказались аналогичны значениям, полученным J. Albaladejo с соавторами (2013) для полуаридной Испании и N. Brahim с соавторами (2014) для Туниса, однако оказались ниже, чем значения S. Siebert (2005) для оазиса Оман – 30.7 г/кг. Стоит отметить, что в исследовании M. Munoz-Rojas с соавторами (2012), проведенном в Южной Испании, значения оказались выше для слаборазвитых почв (Regosols), но аналогичны для солончаков. Более того, концентрация твердых частиц углерода на глубине 0-5 см в цементированных карбонатных почвах (Petric calcisols) оказалась сопоставима (13.02 г/кг) с концентрацией в камбисолях (Cambisols; 14.3 г/кг), зафиксированной I. Dridi и M. Gueddari (2019) в Северном Тунисе. На глубине 0-30 см концентрации твердых частиц оказалась

в пределах, сравнимых с результатами A. Znaidi с соавторами (2019), полученными для слабозрелых почв (Regosols) центрального Туниса (8-14 г/кг), и С. Göll с соавторами (2017) – для полуаридных районов Турции. Однако в нашем исследовании эти концентрации значительно выше, чем в солончаках оазиса Кебили (Omar et al., 2017) и в неокультуренных почвах Габеса (Mlih, 2015).

Такие данные означают, что даже в аридных условиях, для которых характерна высокая минерализация (Matzener, Borken, 2008), гипсоносные почвы сохраняют относительно высокие концентрации органического углерода на сельскохозяйственных землях оазиса. Содержание углерода в них оказалось ниже, чем в почвах субгумидной территории Туниса (до 80%) из исследования A. Bouajila с соавторами (2016) и в аридных почвах Австралии из исследования K.Y. Chan (2001). Тем не менее, наши концентрации были выше, чем у Z. Omar с соавторами (2017) в солончаках и литосолах (Lithosols) пустынного оазиса Кебили. Концентрации неразлагаемого углерода находились в том же диапазоне, что и некоторые почвы на севере (Bouajila et al., 2016) и юге Туниса (Omar et al., 2017, 2020). Иных исследований на содержание твердых частиц или неразлагаемого углерода в южном регионе не проводилось. Вышеупомянутые данные означают, что соотношение твердых частиц органического углерода/запасов углерода в почве несколько различается в верхнем слое в зависимости от типа почвы и глубины. В среднем, содержание твердых частиц углерода составило 21-29% от общего запаса углерода на глубине 0-5 см и 24-33% на глубине 0-30 см.

Запасы почвенного углерода являются основным источником таких частиц и неразлагаемых пулов в почвах исследованной территории (рис. 4). Наши данные об их содержании оказались в пределах того же диапазона, что и у K.Y. Chan (2001) в аналогичных условиях (климат, почвенные свойства, отбор проб с глубины 0-10 см) Южного Уэльса в Австралии. Широко известно, что аридные почвы стран Ближнего Востока и Северной Африки зачастую бедны органическим углеродом, содержание которого составляет в них <0.5% (Mlih et al., 2016). Однако в нашем исследовании содержание углерода в слоях 0-5 и 0-30 см оказалось в полтора и более чем в два раза больше. Этот феномен можно объяснить постоянным обеспечением окультуренных оазисных почв органическими веществами.



**Рис. 4.** Отношение органического углерода в почве с твердыми частицами (а) и неразлагаемым углеродом (б).

*Запасы пулов органического углерода в почвах.* Самая низкая плотность почвенного углерода была обнаружена в Южном Тунисе, поскольку там расположена большая часть пустыни. В слое 0-30 см оазисной почвы запасы оказались больше, чем в исследовании N. Brahim с соавторами (2014), которые установили, что на юго-востоке Туниса запасы в слое 0-30 см составляют в среднем 1.87 кгС/м<sup>2</sup>. Кроме того, запасы в насыщенных слабозрелых почвах (Eutric Regosols) оазиса оказались аналогичны таковым в слабозрелых почвах Бразилии (Batjes, 2005) и Туниса – 3.1 кгС/м<sup>2</sup>

(Brahim et al., 2014; Znaidi et al., 2019). Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks) оазиса содержали более высокие запасы углерода, чем другие солончаки Туниса –  $2.8 \text{ кгС/м}^2$  (Brahim et al., 2014), однако такие же значения были зарегистрированы для солончаков и литосолей (Lithosols) оазиса Кебили. Запасы органического углерода в цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols) в нашем исследовании оказались в том же диапазоне значений, что и в некоторых других работах (Batjes, 2005; Munoz-Rojas et al., 2012). Можно утверждать, что высокие запасы органического углерода в почвах оазиса, вероятно, связаны с попаданием в них перерабатываемых органических остатков, в т.ч. от финиковых пальм. Также мы полностью согласны с мнением R. Lal с соавторами (1999) о том, что аридные почвы могут выступать в качестве поглотителя запасов органического углерода. Во время формирования данного оазиса С. Li с соавторами (2019) доказали высокий потенциал связывания углерода по всему почвенному профилю, а также положительную связь между макроагрегатами и накоплением углеродных запасов. Запасы твердых частиц углерода здесь были несколько выше, чем в оазисе Кебили из исследования Z. Omar с соавторами (2017). Других исследований по запасам твердых частиц в аридных почвах Туниса, к сожалению, не проводилось. В целом, низкие запасы частиц углерода по сравнению с запасами почвенного углерода могут быть результатом высокой минерализации органических веществ в данном регионе.

Минерализацию почвы оазиса повышает вода, используемая при поливе, и высокая температура. О.О. Akinremi с соавторами (1999) подтвердили, что влажность и температура выступали основными факторами, влияющими на почвенное дыхание. Однако значения неразлагаемого органического углерода были значительно выше, чем значения, зарегистрированные Z. Omar с соавторами (2017) в оазисе Кебили. Такие данные согласуются с данными S. Tripathi с коллегами (2006). Запасы твердых частиц углерода/запасы углерода варьировали от 22 до 33% (табл. 4). В разных типах почв и в разных слоях неразлагаемый углерод выступал в качестве самого большого углеродного пула. Самая высокая концентрация неразлагаемого углерода была выявлена в гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks) –  $3.04 \text{ кг/м}^2$ . Можно предположить, что наличие высокого содержания карбоната кальция и гипса защищает неразлагаемый углерод от минерализации. Наше исследование подтверждает, что в этой почве основную часть занимал рекальцитрантный пул органических веществ. А значит, крайне важно сохранить сельскохозяйственную экосистему аридных оазисов для более эффективного депонирования углерода.

**Таблица 4.** Доля нерекальцитрантного органического углерода в исследованных почвах.

Глубина	Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)	Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)	Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)	Цементированные карбонатно-гипсовые почвы (Petrocalcic Gypsisols)
<b>Запасы твердых частиц/запасы углерода, %</b>				
0-5 см	25.8	29.3	26.2	21.6
0-30 см	33.4	24.2	24.7	22.8

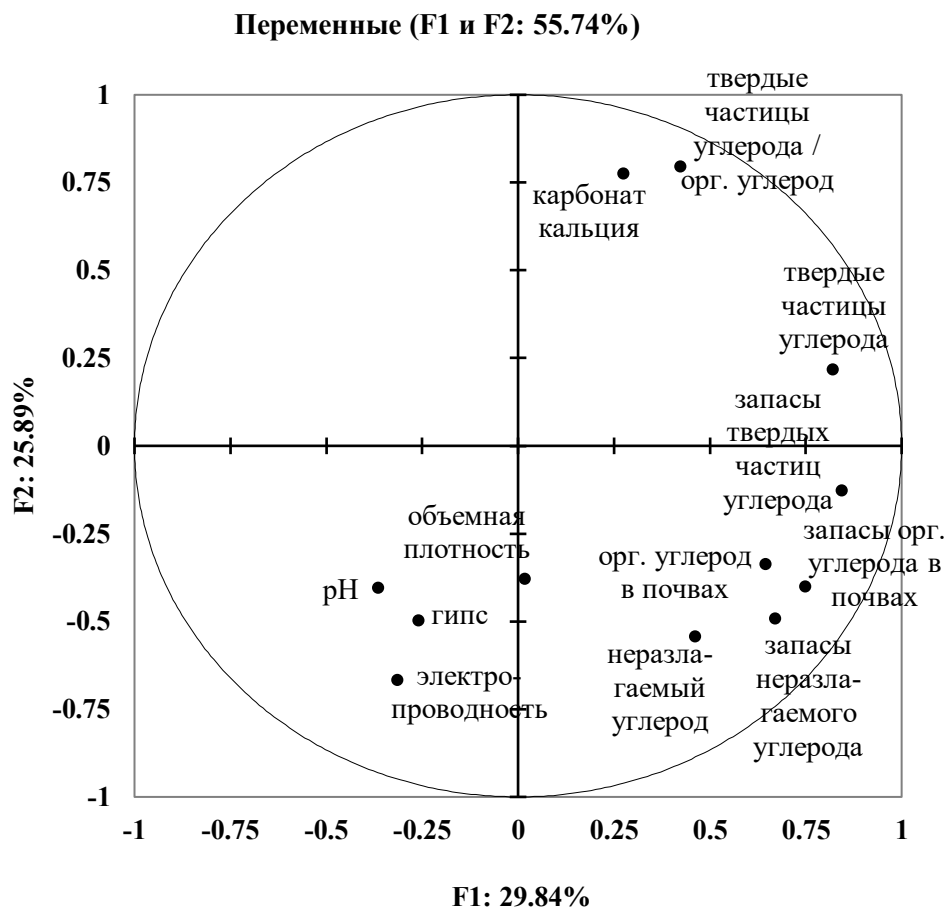
*Влияние свойств почвы на пулы и запасы органического углерода в почвах.* На основе результатов анализа почвенных образцов мы составили матрицу со значимыми корреляциями Пирсона  $p < 0.01$  (\*\*) и  $p < 0.05$  (\*; табл. 5). Значимые и положительные корреляции (табл. 5) наблюдались между почвенными свойствами гипсоносной почвы: например,  $p < 0.05$  у pH и электропроводности с объемной плотностью с коэффициентами корреляции равными 0.404 и 0.430 соответственно; или у электропроводности и содержании гипса ( $r = 0.308$ ). Гипс был определен нами как фактор, повышающий засоление почвы после растворения в воде. Однако между карбонатом кальция и электропроводностью ( $r = -0.393$ ,  $p < 0.05$ ) с гипсом ( $r = -0.532$ ,  $p < 0.01$ ) корреляция оказалась отрицательной. В отличие от многих других авторов, мы не обнаружили корреляций между запасами органического углерода и объемной плотностью, поскольку значения второй были относительно низкими и сходными для разных почв и разной глубины. Тем не менее, в таблице 5 показано, что для пулов органического углерода только твердые частицы отрицательно коррелировали как с pH ( $r = -0.393$ ,  $p < 0.05$ ), так и с электропроводностью ( $r = -0.353$ ,  $p < 0.05$ ). Можно предположить, что высокая

засоленность гипсоносных почв является препятствием для процесса разложения взвешенного органического вещества. По данным R. Setia с соавторами (2011), засоление оказало выраженный негативный эффект на разложение органических веществ.

**Таблица 5.** Корреляция Пирсона между свойствами почв, пулами и запасами органического углерода.

Переменные	pH	Электро-проводность	Объемная плотность	Гипс	Карбонат кальция	Почвенный углерод	Твердые частицы	Неразлагаемый углерод	Запасы почвенного углерода	Запасы Твердых частиц	Запасы неразлагаемого углерода
pH	1.000										
Электро-проводность	0.404*	1.000									
Объемная плотность	0.430*	0.195	1.000								
Гипс	-0.069	0.380*	-0.136	1.000							
Карбонат кальция	-0.293	-0.393*	-0.183	-0.532**	1.000						
Почвенный углерод	-0.203	0.068	0.040	0.002	-0.078	1.000					
Твердые частицы	-0.393*	-0.353*	-0.058	-0.278	0.335	0.762**	1.000				
Неразлагаемый углерод	-0.082	0.255	0.079	0.132	-0.259	0.953**	0.529**	1.000			
Запасы углерода	-0.030	-0.001	0.177	-0.006	-0.079	0.268	0.273	0.223	1.000		
Запасы твердых частиц	-0.121	-0.191	0.099	-0.133	0.102	0.271	0.488**	0.126	0.910**	1.000	
Запасы неразлагаемого углерода	0.010	0.079	0.201	0.047	-0.150	0.252	0.169	0.251	0.985**	0.824**	1.000

Более высокие корреляции ( $p < 0.01$ ) были обнаружены между углеродными пулами и самими запасами. Можно утверждать, что в данном исследовании единственный фактор, контролирующий содержание органического углерода в почвах, – это рециркуляция остатков свежего органического вещества на гипсоносной поверхности в оазисных условиях. С помощью анализа основных компонентов мы обобщили влияние почвенных свойств на пулы и запасы (рис. 5). Первые два компонента объяснили по крайней мере 55.7% общей дисперсии. Все переменные углеродных пулов и запасов (т.е. органический почвенный углерод, твердые частицы углерода, неразлагаемый углерод и запасы каждого из трех) имели положительные координаты по первому фактору (F1) – 29.8% дисперсии. Однако по второму фактору (F2 – 25.8%) карбонат кальция и доли твердых частиц углерода/почвенного углерода имели высокие положительные координаты, в отличие от таких переменных, как электропроводность, содержание гипса, pH и объемная плотность. Анализ основных компонентов ясно показывает, что поступление углерода в почвы является наиболее важным фактором, контролирующим его запасы в исследованных почвах. Тем не менее, карбонат кальция и электропроводность – это основные факторы, влияющие на разложение неразлагаемого углерода. По-видимому, накопление углерода и твердых частиц – это часть баланса между карбонатом кальция, электропроводностью (фактором, ограничивающим деградацию органических остатков) и степенью минерализации (которая усиливается из-за микроклиматических условий). Следовательно, гипсоносные аридные почвы способны накапливать органический углерод, если они постоянно пополняются органическими останками в условиях сельскохозяйственных земель оазиса.



**Рис. 5.** Анализ основных аналитических свойств почвы и пулов и запасов органического углерода в ней.

### Выводы

Таким образом, мы делаем вывод о том, что аридные почвы могут хранить более 1% органического углерода в оазисах (глобально аридные – не более 0.5%). Не разлагаемый углерод оказался основным пулом, который нам удалось обнаружить, потому что, вероятно, от разложения его защищает засоление почвы. Также данное исследование показывает, что сельскохозяйственные экосистемы оазиса положительно влияют на запасы органического углерода в гипсоносных почвах: в слое 0-5 см запасы колебались в среднем от 0.4 до 0.8 кгС/м<sup>2</sup>, а в слое 0-30 см достигали в среднем 4 кгС/м<sup>2</sup> как в цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols), так и в гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks), и 3.5 кгС/м<sup>2</sup> – в насыщенных слабозрелых (Eutric Regosols) и цементированных гипсовых (Petric Gypsisols) почвах. Данные показатели близки к значениям, которые были рассчитаны для других систем землепользования в более влажных регионах. Основная часть углеродных запасов существует благодаря мелкодисперсным минеральным, относительно стабильным включениям. Главный фактор, который контролирует запасы углерода в перечисленных почвах, это их постоянное пополнение свежими органическими останками, в частности, от финиковых пальм. Поэтому в аридных регионах адаптированные сельскохозяйственные системы, особенно оазисы, улучшают связывание органического углерода в аридных условиях.

*Финансирование.* Данное исследование осуществлялось в рамках Исследовательского гранта (STC\_TUNGER-006/INTOASES) в рамках двустороннего научно-технического сотрудничества Тунисской Республики и Федеративной Республикой Германия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Akinremi O.O., McGinn S.M., McLean H.D.J.* 1999. Effects of Soil Temperature and Moisture on Soil Respiration in Barley and Fallow Plots // *Canadian Journal of Soil Science*. Vol. 79. P. 5-13.
- Amin M., Khan M.J., Jan M.T., ur Rehman M., Tariq J.A., Hanif M., Shah Z.* 2014. Effect of Different Tillage Practices on Soil Physical Properties under Wheat in Semi-arid Environment // *Soil Environment*. Vol. 33. P. 33-37.
- Albaladejo J., Ortiz R., Garcia-Franco N., Ruiz N.A., Almagro M., Pintado J.G., Martínez-Mena M.* 2013. Land Use and Climate Change Impacts on Soil Organic Carbon Stocks in Semi-arid Spain // *Journal of Soils Sediments*. Vol. 13. P. 265-277.
- Batjes N.H.* 2002. Carbon and Nitrogen Stocks in the Soils of Central and Eastern Europe // *Soil Use Management*. Vol. 18. P. 324-329.
- Batjes N.H.* 2005. Organic Carbon Stocks in Soils of Brazil // *Soil Use Management*. Vol. 21. P. 22-24.
- Bouajila A., Gallali T.* 2010. Land Use Effect on Soil and Particulate Organic Carbon, and Aggregate Stability in Some Soils in Tunisia // *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 5. P. 764-774.
- Bouajila A., Brahim N., Gallali T.* 2016. Rôle des différentes fractions organiques dans la stabilité structurale des sols à textures riches en sables du Nord et du Centre de la Tunisie // *Etude et Gestion des Sols*. Vol. 23. P. 79-92 (in French).
- Bouksila F., Bahri A., Berndtsson R., Persson M., Rozema J., Zee V.* 2013. Assessment of Soil Salinization Risks under Irrigation with Brackish Water in Semiarid Tunisia // *Environmental and Experimental Botany*. Vol. 92. P. 176-185.
- Boulbaba A., Marzouk L., Rabah B.R., Najet S.* 2012. Variations of Natural Soil Salinity in an Arid Environment Using Underground Watertable Effects on Salinization of Soils in Irrigated Perimeters in South Tunisia // *International Journal of Geoscience*. Vol. 3. P. 1040-1047.
- Brahim N., Ibrahim H., Hatira A.* 2014. Tunisian Soil Organic Carbon Stock: Spatial and Vertical Variation // *Procedia Engineering*. Vol. 69. P. 1549-1555.
- Brahim N., Karbout N., Dhaouadi L., Bouajila A.* 2021. Global Landscape of Organic Carbon and Total Nitrogen in the Soils of Oasis Ecosystems in Southern Tunisia // *Agronomy*. Vol. 11. P. 1903.
- Cambardella C.A., Elliot E.T.* 1992. Particulate Soil Organic Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 56. P. 777-783.
- Chan K.Y.* 2001. Soil Particulate Organic Carbon under Different Land Use and Management // *Soil Use and Management*. Vol. 17. P. 217-221.
- Dridi I., Gueddari M.* 2019. Field and Laboratory Study of Nitrogen Mineralization Dynamics in Four Tunisian Soils // *Journal of African Earth Sciences*. Vol. 154. P. 101-110.
- Elbasiouny H., Bowaly A., Gad A., Alkheir A.A., Elbehiry F.* 2017. Restoration and Sequestration of Carbon and Nitrogen in the Degraded Northern Coastal Area in Nile Delta, Egypt for Climate Change Mitigation // *Journal of Coastal Conservation*. Vol. 21. P. 105-114.
- Göl C., Bulut S., Bolat F.* 2017. Comparison of Different Interpolation Methods for Spatial Distribution of Soil Organic Carbon and Some Soil Properties in Black Sea Backward Region of Turkey // *Journal of African Earth Sciences*. Vol. 06.014. P. 85-91.
- Haj-Amor Z., Hashemi H., Bouri S.* 2017. Soil Salinization and Critical Shallow Groundwater Depth under Saline Irrigation Condition in a Saharan Irrigated Land // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 10. P. 301-312.
- Hassink J., Whitmore A.P., Kubat J.* 1997. Size and Density Fractionation of Soil Organic Matter and the Physical Capacity of Soils to Protect Organic Matter // *European Journal of Agronomy*. Vol. 7. P. 189-199.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps // *World Soil Resources Reports*. Rome: FAO. No. 106. 192 p.
- Lal R.* 2002. Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems of West Asia and North Africa // *Land Degradation and Development*. Vol. 13. P. 45-59.
- Lal R., Hassan H.M., Dumanski J.* 1999. Desertification Control to Sequester C and Mitigate the Greenhouse Effect // *Carbon Sequestration in Soils: Science, Monitoring and Beyond* / Eds. N. Rosenberg, R.C. Izaurralde, E.L. Malone. Columbus, OH: Battelle Press. P. 83-149.
- Li C., Li Y., Xie J., Liu Y., Wang Y., Liu X.* 2019. Accumulation of Organic Carbon and Its Association with Macro-aggregates During 100 Years of Oasis Formation // *Catena*. Vol. 172. P. 770-780.
- Liebens J., van Molle M.* 2003. Influence of Estimation Procedure on Soil Organic Carbon Stock Assessment in Flanders, Belgium // *Soil Use Manage.* Vol. 19. P. 364-371.
- McLean E.O.* 1982. Soil pH and Lime Requirement // *Methods of Soil Analysis*. Pt. 2, 2<sup>nd</sup> ed. / ed. A.L. Page. Vol. 9. Maddison, WI: ASA and SSSA. P. 199-224.
- Matzener E., Borken W.* 2008. Do Freeze/Thaw Events Enhance C and N Losses from Soil of Different Ecosystems? A Review // *European Journal of Soil Science*. Vol. 5. P. 274-284.
- Mlih R.* 2015. Soil Organic Matter Management in Coastal and Desert Oasis – A Case Study for the Gabès and Kebili Oasis in Tunisia. Master Thesis. Germany: Yulich University. 94 p.

- Mlih R., Bol R., Amelung W., Brahim N. 2016. Soil Organic Matter Amendments Indate Palm Groves of the Middle Eastern and North African Region: A Mini-review // *Journal of Arid Land*. Vol. 8. P. 77-92.
- Mlih R., Gocke M.I., Bol R., Berns A.E., Fuhrmann I., Brahim N. 2019. Soil Organic Matter Composition in Coastal and Continental Date Palm Systems – Insights from Tunisian Oases // *Pedosphere*. Vol. 29. P. 444-456.
- Munoz-Rojas M., Jordan A., Zavala L., de la Rosa D., Abd-Elmabod S., Anaya-Romero M. 2012. Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain) // *Solid Earth*. Vol. 3. P. 375-386.
- Nelson R.E. 1982. Carbonate and Gypsum // *Methods of Soil Analysis*. Pt. 2, 2<sup>nd</sup> ed. / ed. A.L. Page. Maddison, WI: ASA and SSSA. Vol. 9. P. 181-197.
- Nelson D.W., Sommers L.E. 1982. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter // *Methods of Soil Analysis*. Pt. 2, 2<sup>nd</sup> ed. / eds. A.L. Page, R.H. Miller. Maddison, WI: ASA and SSSA. P. 539-577.
- Omar Z., Bouajila A., Brahim N., Grira M. 2017. Soil Property and Soil Organic Carbon Pools and Stocks of Soils Under Oasis in Arid Regions of Tunisia // *Environmental Earth Sciences*. Vol. 76. P. 415-425.
- Omar Z., Bouajila A., Bouajila J., Rahman R., Besser H., Hamed Y. 2020. Spectroscopic and Chromatographic Investigation of Soil Organicmatter Composition for Different Agrosystems from Arid Saline Soils from Southeastern Tunisia // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 13. 524 p.
- Pandey C.B., Singh G.B., Singh S.K., Singh R.K. 2010. Soil Nitrogen and Microbial Biomass Carbon Dynamics in Native Forests and Derived Agricultural Land Uses in a Humid Tropical Climate of India // *Plant and Soil*. Vol. 33. P. 453-467.
- Pouget M. 1965. Etude pédologique de la zone Gabès-Nord // *Sect. Et. Pehl*. Vol. 246. 76 p.
- Setia R., Marschner P., Baldock J., Chittleborough D., Smith P., Smith J. 2011. Salinity Effects on Carbon Mineralization in Soils of Varying Texture // *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 43. P. 1908-1916.
- Siebert S. 2005. Analysis of Arid Agricultural Systems Using Quantitative Image Analysis, Modeling and Geographical Information Systems. Kassel University press GmbH. 180 p.
- Sinoga J.D.R., Pariente S., Diaz A.R., Francisco J., Murillo M. 2012. Variability of Relationships Between Soil Organic Carbon and Some Soil Properties in Mediterranean Rangelands under Different Climatic Conditions (South of Spain) // *Catena*. Vol. 94. P. 17-25.
- Smith J.L., Doran J.W. 1996. Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis // *Methods for Assessing Soil Quality*. Madison, WI: Soil Science Society of America, Special Publication. Vol. 49. P. 169- 185.
- Suliman M., Sallam A.A. 2016. Improved Method to Determine Particle Size Distribution for Some Gypsiferous Soils. A Case Study from Al-Ahsa Governorate, Saudi Arabia // *Eurasian Soil Science*. Vol. 5. P. 322-331.
- Fourati T.H., Bouaziz M., Benzina M., Bouaziz S. 2015. Modeling of Soil Salinity within a Semi-arid Region Using Spectral Analysis // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 8. P. 11175- 11182.
- Tripathi S., Kumari A., Chakraborty A., Gupta A., Chakrabarti K., Bandyapadhyay B.K. 2006. Microbial Biomass and Its Activities in Salt-affected Coastal Soils // *Biology and Fertility of Soils*. 42. P. 273-277.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 1997. World Atlas of Desertification. 2<sup>nd</sup> ed. 182 p.
- Vieillefont J. 1979. Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux // *Cahiers ORSTOM. Série Pédol*. Vol. 17. P. 195-223. (in Frensh)
- Wang S., Wilkes A., Zhang Z., Chang X., Lang R., Wang Y., Niu H. 2011. Management and Land Use Change Effects on Soil Carbon in Northern China's Grasslands: A Synthesis // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 142. P. 329-340.
- Wiesmeier M., Schad P., Poeplau C., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., Kögel-Knabner I. 2014. Quantification of Functional Soil Organic Carbon Pools for Major Soil Units and Land Uses in Southeast Germany (Bavaria) // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 185. P. 208-220.
- Wong V.N.L., Dalal R.C., Greene R.S.B. 2009. Carbon Dynamics of Sodic and Salin Soils Following Gypsum and Organic Material Additions: A Laboratory Incubation // *Applied Soil Ecology*. Vol. 41. P. 29-40.
- Xu E., Zhang H., Xu Y. 2020. Exploring Land Reclamation History: Soil Organic Carbon Sequestration due to Dramatic Oasis Agriculture Expansion in Arid Region of Northwest China // *Ecological Indicators*. Vol. 108. P. 105746.
- Yigini Y., Panagos P. 2016. Assessment of Soil Organic Carbon Stocks under Future Climate and Land Cover Changes in Europe // *Science of the Total Environment*. Vol. 557. P. 838-850.
- Zhang K.C., An Z.S., Cai D.W., Guo Z.C., Xiao J.H. 2017. Key Role of Desert-Oasis, Transitional Area in Avoiding Oasis Land Degradation from Aeolian Desertification in Dunhuang, Northwest China // *Land Degradation & Development*. Vol. 28. P. 142-150.
- Znaïdi A., Brahim N., Ibrahim H., Bol R., Chaouachi M. 2020. Comparison of Organic Carbon Stock of Regosols under Two Different Climates and Land Use in Tunisia // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 13. P. 1011.



УДК 581.5: 58.02

**МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЗАПАСОВ ЖИВОЙ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ  
СТЕПНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПОСЛЕ ПОЖАРА (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА  
«БУРТИНСКАЯ СТЕПЬ» ЗАПОВЕДНИКА «ОРЕНБУРГСКИЙ»)**

© 2023 г. Г.Х. Дусаева, О.Г. Калмыкова

*Институт степи Оренбургского федерального исследовательского центра  
Уральского отделения РАН*

*Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11. E-mail: 16guluy@mail.ru, o.k.81@list.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 10.01.2023. Принята к публикации 13.01.2023.

В последние годы в аридных регионах России отмечается катастрофическое увеличение площади и частоты пожаров в степях. При этом выгорает вся надземная часть фитоценозов, что в значительной степени снижает запасы надземной фитомассы, продуктивность сообществ, изменяет структуру и состав степных фитоценозов. Целью нашего исследования было изучить влияние пирогенного фактора на запасы живой надземной фитомассы и определить сроки ее восстановления. На участке «Буртинская степь» Государственного природного заповедника «Оренбургский» в 2015 г. после пожара было заложено 6 мониторинговых участков, каждый включал в себя контрольную (негоревшую) и горевшую площадку. Для выявления особенностей динамики запасов живой надземной фитомассы использованы стандартные геоботанические методики и метод укосных площадей. Исследования были проведены в период 2015-2020 гг. В результате изучения влияния пирогенного фактора на растительный покров степей было установлено, что запасы живой надземной фитомассы ( $\text{г/м}^2$ ) достигают значения контрольных сообществ на второй год исследования. Сезонная динамика запасов живой фитомассы с 3-4 года после пожара больше зависит от состава и типа сообщества, а не от того, подвергалось ли оно воздействию пирогенного фактора. За весь период исследования доля запасов живой фитомассы от общей надземной фитомассы горевших сообществ приближалась к значениям контрольных фитоценозов, однако всегда была больше контроля, что указывает на неполное восстановление структуры надземной фитомассы на гари. *Ключевые слова:* степные пожары, запасы живой надземной фитомассы, сезонная динамика, разногодичная динамика, ООПТ, восстановление растительного покрова, Оренбургская область.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-67-76**

**EDN: НКХЕХJ**

Пожары происходят в сообществах различных типов растительности, но особенно широко они распространены в степях и пустынях (Родин, 1981). В отличие, например, от пожаров на землях государственного лесного фонда, степные пожары не фиксируются, не учитываются и не тушатся, если нет непосредственной угрозы объектам инфраструктуры или особо охраняемым природным территориям (ООПТ; Шинкаренко и др., 2021). При этом выгорают сотни тысяч километров степей, срок восстановления которых определяется разными специалистами от пары месяцев до нескольких десятилетий (Иванов, 1958; Опарин, Опарина, 2003; Степные пожары ..., 2015).

На рубеже XX и XXI вв. в степной зоне катастрофически увеличились частота и площади пожаров. Так, в Волгоградской области в 1998-2018 гг. огнем пройдено более 40% естественных зональных ландшафтов, а отдельные участки горели более 10 раз (Шинкаренко, 2015; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019), а в Астраханской области выгорело около 60% зональных ландшафтов (Шинкаренко, 2018). В отдельные годы пройденная огнем площадь на юго-востоке Европейской России превышала  $10000 \text{ км}^2$  (Шинкаренко и др., 2021). Анализ доступных космических изображений Landsat за период 1984-2014 гг. по различным территориям Заволжско-Уральского региона свидетельствует о резком увеличении количества и площади пожаров повсеместно с конца 1990-х годов (Павлейчик, 2016). Сходные выводы сформулированы и по другим регионам РФ (Дубинин

и др., 2010; Ткачук, 2015).

В связи с повсеместной активизацией пожарных явлений в степной зоне, значительную роль этот фактор приобретает и на особо охраняемых природных территориях. На ООПТ в засушливой зоне России (заповедников «Астраханский», «Богдинско-Баскунчакский», «Черные земли», федеральных заказников «Меклетинский», «Сарпинский», «Харбинский» и регионального заказника «Степной») за 2001-2019 гг. было идентифицировано 10169 гарей за весь период исследований на ООПТ и в 20-километровой окрестности. В заповеднике «Черные земли» не осталось не пройденных огнем участков. В Астраханском заповеднике и его окрестностях отмечается в среднем 17 пожаров в год (Шинкаренко и др., 2021). Заповедный кластер «Буртинская степь» за счет частых пожаров может выгорать полностью в течение 5-6 лет (Павлейчик, 2015).

Живая фитомасса первой отвечает на воздействие пирогенного фактора в степном растительном покрове как наиболее быстро восстанавливающийся и мобильный компонент, на основе которого фитоценоз в дальнейшем формирует остальные компоненты фитомассы (ветошь и подстилку). Влияние пожара на растительный покров степей и на живую фитомассу в частности всегда оценивалось неоднозначно. В работах многих авторов отмечается увеличение живой фитомассы горевших площадок по отношению к контролю (Иванов, 1958; Dhillion, Anderson, 1994; Fuhlendorf, Engle, 2004; Юнусбаев, Абдуллина, 2010; Pereira et al., 2015; Valkó et al., 2016). Противоположные результаты получены Д.Ф. Федюнькиным (1953), отметившим снижение запасов живой фитомассы после пожара. Ю.М. Мирошниченко (1971) указал, что такое снижение может достигать 25%. У.Б. Юнусбаев и К.Х. Абдуллина (2010) наблюдали снижение запасов живой надземной фитомассы после летнего пожара и увеличение после ранневесеннего. Подробное рассмотрение структуры и динамики запасов живой фитомассы поможет понять основные этапы восстановления степной растительности после пожара.

#### Объект и методы исследования

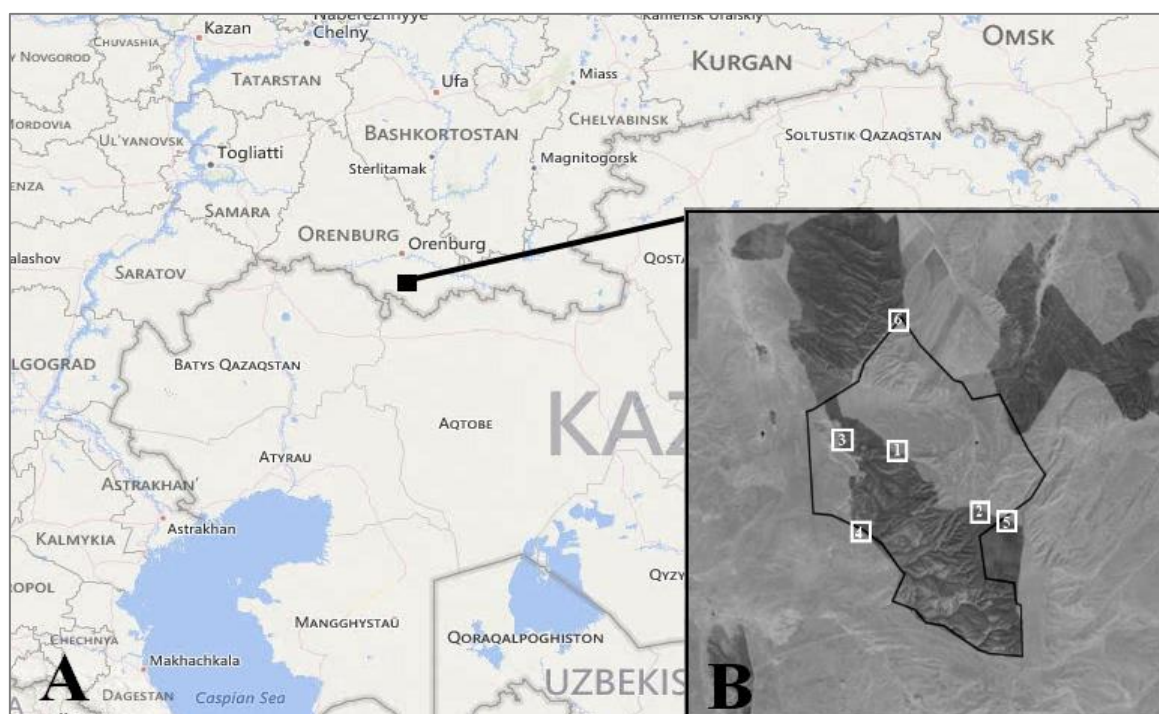
В качестве модельной территории для проведения исследования был выбран участок «Буртинская степь» заповедника «Оренбургский». Общая площадь участка составляет 4500 га. В связи с произошедшим в августе 2014 года пожаром возникла необходимость и возможность оценить влияния пожара на степную растительность заповедника и наблюдать за ее восстановительной динамикой. Исследования проводились в 2015-2020 гг.

В ботанико-географическом отношении Буртинская степь расположена в подзоне разнотравно-дерновиннозлаковых Заволжско-Казахстанских степей (Зоны и типы поясности ..., 1999а, б; Сафронова, Калмыкова, 2012). Основными чертами климата «Буртинской степи» являются континентальность, жаркое сухое лето (средняя температура июля – +22°C), довольно холодная зима (средняя температура января – -15-8°C), быстрый переход от зимы к лету, короткий, интенсивно проходящий весенний период, неустойчивость и недостаточность атмосферных осадков (среднегодовое количество осадков 327 мм; Степной заповедник ..., 1996). Почвы участка представлены черноземами южными (обычными), карбонатными, неполноразвитыми (Блохин, 1997; Климентьев и др., 2001).

Для проведения исследований было организовано 6 стационарных участков, каждый из которых включал 2 части – горевшую (А) и негоревшую или контрольную (Б; рис. 1). В 2018 г. контрольная площадка участка № 4 сгорела, поэтому в непосредственной близости, в схожих условиях, была заложена новая контрольная площадка – 4В. Ежегодно в июне с 2015 по 2020 гг. выполнялись геоботанические описания площадок (за весь срок исследования – 75 геоботанических описаний). Учет надземной фитомассы проводился методом укосных площадей (Родин и др., 1968; Базилевич и др., 1978). Укосы производились в каждом сообществе в течение вегетационного сезона (с мая по сентябрь). Растения срезались вровень с почвой на площадках по 0.25 м<sup>2</sup> в 3-кратной повторности. В лабораторных условиях за 6 лет исследования было обработано 1122 растительных образца, которые разделялись по группам: злаки, бобовые, разнотравье, осоки, полукустарнички, кустарнички, кустарники, полукустарники.

Растительные сообщества на ключевых участках относятся к различным группам ассоциаций

двух формаций – *Stipeta zalesskii*<sup>1</sup> и *Stipeta lessingiana*, наиболее широко представленных в растительном покрове заповедника (Калмыкова, 2008). В качестве содоминанта на всех участках выступал плотнoderновинный степной ксерофитный злак *Festuca valesiaca* Gaudin. Помимо доминантов к преобладающим злакам на участке 1 также относилась *Poa transbaicalica* Roshev., на участке 2 – *Helictotrichon desertorum* (Less.) Nevski, на участке 4 – *Stipa capillata* L., 5 – *S. lessingiana* Trin. & Rupr., на участке 6 – *Stipa pulcherrima* K. Koch, *Stipa lessingiana* Trin. & Rupr., *Stipa capillata*, *Poa transbaicalica*. На всех участках заметного обилия достигало разнотравье, представленное в основном степными мезоксерофитными и ксерофитными видами: *Galatella villosa* (L.) Rehb. f., *Ferula tatarica* Fisch. ex Spreng., *Galium ruthenicum* Willd., *Medicago romanica* Prodan, *Hieracium virosum* Pall., *Scorzonera stricta* Hornem., *Scorzonera austriaca* Willd., *Potentilla humifusa* Willd. ex Schtdl., *Galium octonarium* (Klokov) Soó, *Cephalaria uralensis* (Murray) Schrad. ex Roem. & Schult., *Salvia tesquicola* Klokov & Pobed. Из полукустарничков в составе сообществ отмечались *Artemisia austriaca* Jacq., *A. marschalliana* Spreng., *Astragalus macropus* Bunge, *Eremogone koriniana* (Fisch. ex Fenzl) Ikonn., *Onosma simplicissima* L., *Thymus marschallianus* Willd. Наиболее обильны в сообществах были первые два вида. Кустарники встречались в составе фитоценозов на участках 1, 3, 6 (*Spiraea crenata* L.) и 2 (*Spiraea hypericifolia* L.).



**Рис. 1.** Расположение заповедного участка и картосхема расположения мониторинговых участков. Условные обозначения: А – местоположение участка «Буртинская степь», В – площадь, сгоревшая в 2014 году (темно-серый цвет), и, черная линия – граница участка «Буртинская степь», 1-6 – стационарные мониторинговые участки.

Растительные сообщества на горевших участках отличались от негоревших (контрольных), особенно в первые годы после пожара. На некоторых площадках в результате выгорания растительного покрова доминанты и содоминанты растительных менялись местами. В первые годы после пожара на горевших участках возрастало обилие эфемероидов (*Valeriana tuberosa* L., виды рода *Tulipa*, *Allium tulipifolium* Ledeb., *Poa bulbosa* L.), некоторых двулетников (*Sisymbrium polymorphum* (Murray) Roth, *Verbascum phoeniceum* L., *Falcaria vulgaris* Bernh.), многолетников (*Ferula caspica* M. Bieb., *F. tatarica* Fisch. ex Spreng.), а местами и полукустарничков (*Eremogone koriniana*, *Artemisia austriaca*; Kалмыкова et al., 2019); на нарушавшихся ранее участках возрастало обилие сорных видов,

<sup>1</sup> Латинские названия видов растений приводятся по работе С.К. Черепанова (1995).

таких как *Chenopodium strictum* Roth. Общее проективное фитоценозов на негоревших площадках варьировало в разные годы от 80 до 100%, на горевших – от 45-47 до 95%.

Следует отметить, что участки 1 и 3 в наибольшей степени пострадали от перевыпаса в дозаповедный период, а участок 4, расположенный в охранной зоне заповедника, – это старовозрастная залежь.

### Результаты и обсуждение

*Сезонная динамика запасов живой фитомассы.* Динамика запасов живой надземной фитомассы большинства фитоценозов, подвергавшихся воздействию пожара в 2015-2016 гг., была сходной – с пиком в июне и их снижением в следующие месяцы (рис. 2). Подобную картину в горевших степных фитоценозах Тувы наблюдали А.А. Титлянова и А.Д. Самбуу (2016), которые отметили, что в течение 6 лет динамика обновления различных фракций фитомассы почти одинакова в степях различного подтипа. А в восточных и центральных степях Крыма исследователи выявили стирание индивидуальности степных фитоценозов после пожара во флористическом составе (Кобечинская, Андреева, 2018). В контрольных сообществах в эти годы динамика запасов живой надземной фитомассы была более разнообразной в различных фитоценозах (рис. 3).

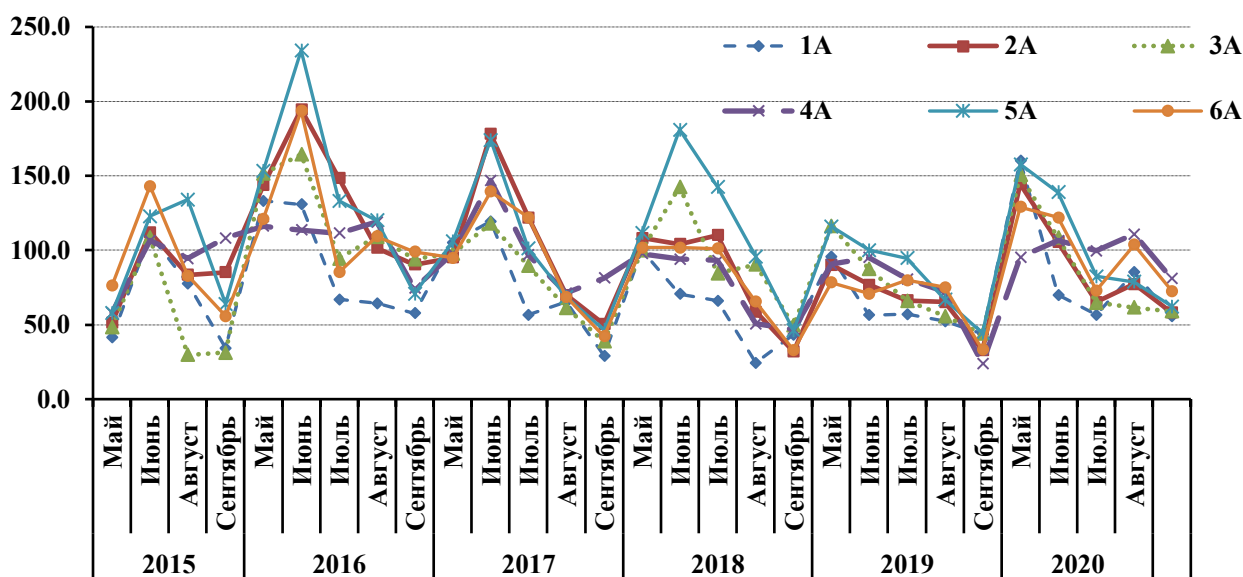


Рис. 2. Динамика запасов живой надземной фитомассы горевших сообществ в 2015-2020 гг., г/м<sup>2</sup>.

Это объясняется упрощением состава и структуры фитоценозов после пожара, изменением соотношения компонентов надземной фитомассы, роли отдельных видов в ее формировании и напротив, большей экологической и биоморфологической полнотностью негоревших фитоценозов с сохранением фитоценотической роли видов, а также их экологических и биоморфологических групп, проявляющейся в определенный период вегетационного сезона. Запасы живой надземной фитомассы в 2017 г. в эталонных и подвергшихся пожару сообществах накапливались сходно и возрастали к июню. В 2018 г. четко выраженных пиков в динамике запасов живой фитомассы не наблюдалось на большинстве площадок (как горевших, так и не горевших). В 2019-2020 гг. наибольшие значения живой фитомассы приходились на май-июнь. В целом запасы живой фитомассы горевших и контрольных сообществ изменялись в течение сезона сходно с 2017 г. Наибольшие запасы были характерны для начала вегетационного сезона, что определяется активным развитием доминирующих плотнодерновинных злаков и разнотравья, снижение происходило к концу вегетационного сезона. При еще одном варианте динамики живой надземной фитомассы к августу увеличивались запасы живой надземной фитомассы и динамика становилась двувёршинной, как, например, в 2016, 2018 и 2020 гг., что возможно, связано со вторичной вегетацией некоторых видов злаков.

*Разногодичная динамика запасов живой надземной фитомассы.* На рисунке 3 видно, что запасы

живой фитомассы на контрольных площадках постепенно снижаются с 2016 по 2019 гг. При рассмотрении запасов живой фитомассы по компонентам было выявлено, что в 2018-2019 гг. уменьшились запасы фитомассы злаков и полукустарничков. Визуально отмеченное уменьшение запасов общей фитомассы для каждой площадки статистически подтвердить не удалось. С помощью метода линейной регрессии снижение этого показателя на всех контрольных площадках с 2016 по 2019 гг. характеризовалось коэффициентом корреляции ( $r$ ), колеблющимся от  $-0.4$  до  $-0.7$ , однако максимальный коэффициент детерминации ( $R^2$ ) был равен  $0.5$  на площадках 2Б и 4Б (сгорела в 2018 г.). На других площадках  $R^2$  колебался от  $0.2$  до  $0.3$ , что говорит о слабой зависимости. На горевших площадках  $R^2$  еще ниже, а коэффициент корреляции находился в диапазоне от  $-0.4$  до  $-0.5$ .

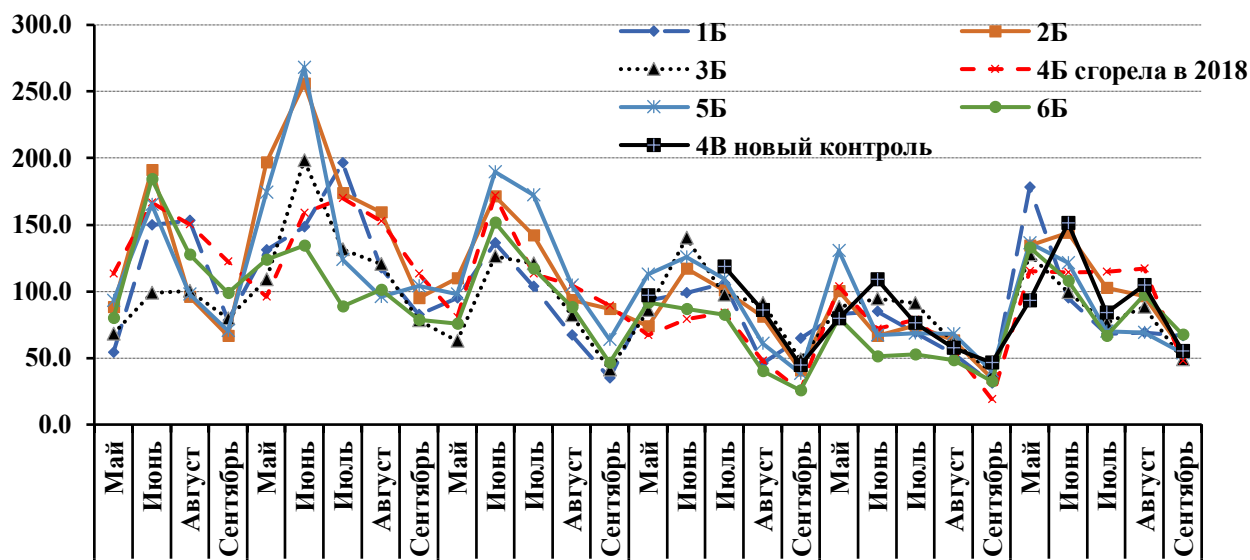


Рис. 3. Динамика запасов живой надземной фитомассы контрольных сообществ, г/м<sup>2</sup>.

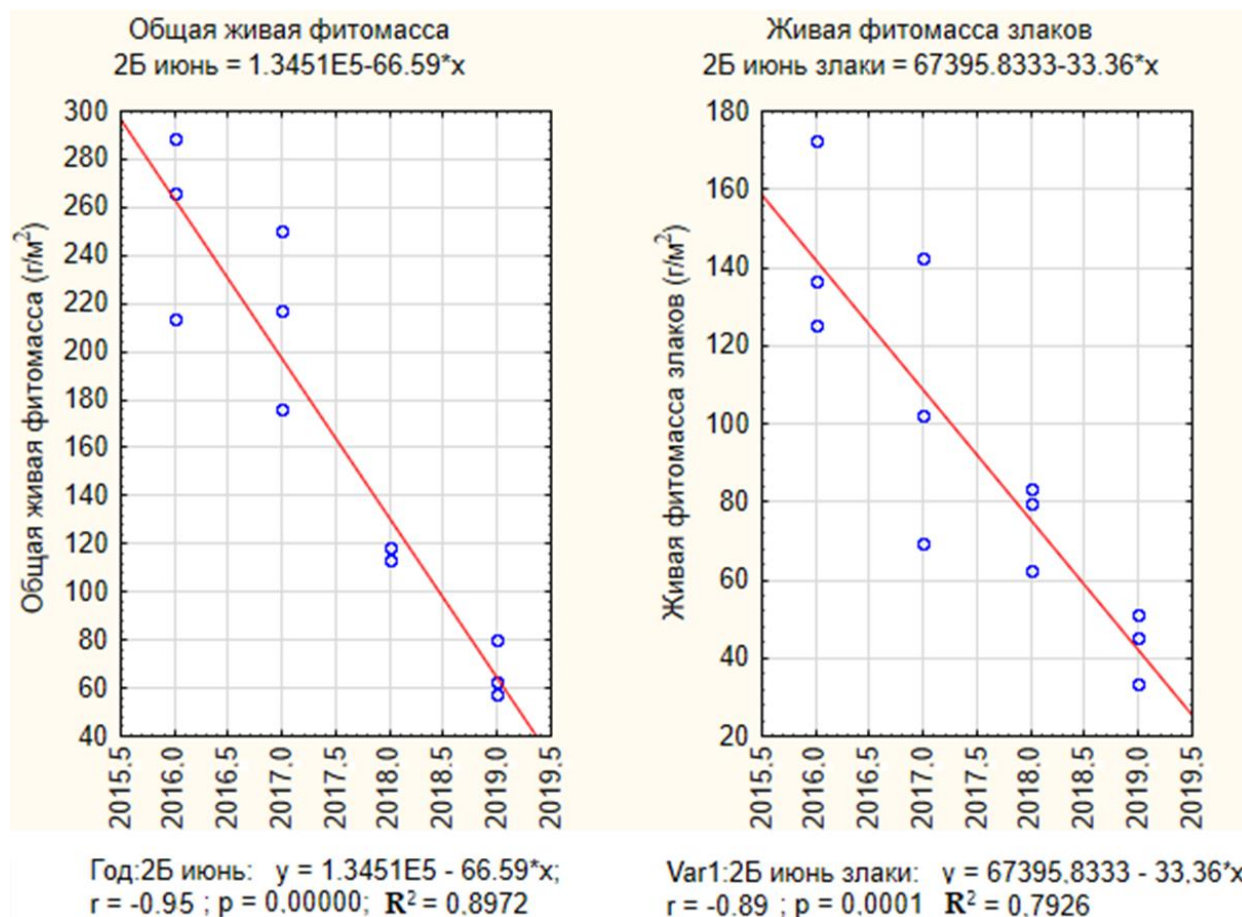
При исследовании пирогенного фактора в степях Тувы А.А. Титлянова и А.Д. Самбуу (2016) отмечали, что ко второму году после пожара запас живой фитомассы был максимален и плавно снижался к шестому году, достигая средних величин живой фитомассы, характерных для каждого подтипа степи. В наших исследованиях на большинстве и контрольных и горевших площадок в 2016 г. (на второй год после пожара) были отмечены максимальные запасы живой надземной фитомассы, которые с 2016 по 2019 гг. достоверно снижались лишь в некоторые месяцы на некоторых площадках. При оценке динамики запасов живой фитомассы по месяцам для каждой площадки с 2016 по 2019 гг. методом линейной регрессии было выявлено достоверное снижение (при  $R^2 = 0.6-0.9$ ,  $r = -0.7-0.9$ ) на площадках 2Б, 5Б, 6Б в июне, 2Б и 4Б в июле, 1Б, 2Б и 4Б в августе, 2Б, 4Б и 6Б в сентябре. В горевших сообществах достоверное снижение выявлено для площадок 2А и 6А в июне, 2А в июле, 2А, 4А и 6А в сентябре.

При расчете коэффициентов корреляции и детерминации для запасов живой фитомассы злаков было выявлено, что она достоверно снижалась на тех же площадках и в те же месяцы, что и общая живая фитомасса, ведь злаки составляют основную массу живой общей фитомассы (рис. 4). При этом на горевших площадках проективное покрытие злаков год от года увеличивалось, а количество их видов в основном прибавлялось в сообществах и лишь изредка снижалось. В контрольных сообществах четкого тренда на снижение или увеличение проективного покрытия злаков выявлено не было, а виды в сообществах добавлялись или выбывали без выраженных закономерностей (максимально выпадало и добавлялось по 2 вида).

При сравнении результатов измерения запасов живой надземной фитомассы за весь год по парам фитоценозов (горевший с негоревшим), объединенных в пределах одного мониторингового участка, при помощи U-критерия Манна-Уитни (при уровне значимости  $p < 0.05$ ) было выявлено, что на площадках № 1, 3, 4 этот показатель на горевших участках достоверно отличался от контрольных в 2015 г. На остальных площадках различий не было. Таким образом, статистически значимые



отличия величин запасов живой надземной фитомассы от контрольных установлены в первый год после пожара для фитоценозов на участках с интенсивным выпасом до создания заповедника (участки № 1 и 3) и антропогенно измененных в прошлом (старовозрастная залежь на участке № 4). В последующие годы U-критерий не показал статистически значимых различий между годовыми запасами живой надземной фитомассы в горевших и негоревших сообществах на большинстве площадок. Исключение составили участки № 5 в 2018 г. и № 6 в 2019 г., где запасы живой фитомассы горевших сообществ достоверно превышали запасы контрольных.



**Рис. 4.** Графики линейной регрессии общей живой фитомассы и живой фитомассы злаков на площадке 2Б в июне, г/м<sup>2</sup>.

В апреле 2018 г. площадка 4Б сгорела, ввиду чего рядом была заложена новая контрольная площадка 4В. При анализе запасов живой надземной фитомассы между площадками 4Б и 4В U-критерий Манна-Уитни выявил статистически значимые различия в 2019 г. К 2020 году различий в запасах живой надземной фитомассы на этих площадках выявлено не было. Таким образом, на примере мониторингового участка № 4 были повторно получены те же результаты восстановления живой надземной фитомассы, что и в первоначально заложенном опыте. Следовательно, живая надземная фитомасса горевших в прошлом, антропогенно нарушенных сообществ достигает контрольных или близких к ним значений уже на второй год после пожара, а на ненарушенных участках не отличались запасы уже в первый год.

*Динамика доли живой фитомассы от общих запасов надземной фитомассы.* В начале вегетационного сезона доля запасов живой фитомассы была наибольшей как на контрольных, так и на горевших площадках. К концу вегетационного сезона она закономерно снижалась. В горевших сообществах в первый год после пожара доля живой фитомассы от общих запасов сообщества в начале сезона находилась в диапазоне 56-100%, а к концу вегетации снизилась до 32-77%. На контрольных площадках в начале вегетационного сезона доля живой фитомассы составляла 28-

46%, к концу сезона снижалась до 11-37%. В структуре запасов общей надземной фитомассы горевших сообществ в первый год после пожара наблюдался сильный перекоп в сторону запасов живой фитомассы, мортмасса накапливалась в малых количествах, часто выносилась ветром с неукрепленной почвы либо, ввиду своих малых запасов, быстро переходила в почву. Во второй год после пожара доля живой фитомассы в мае-июне колебалась в диапазоне 52-86%, тогда как в контрольном сообществе доля живой фитомассы была гораздо меньше и составляла 15-40%. К концу вегетации в горевших сообществах доля живой фитомассы составляла 24-60%, а в контрольных фитоценозах составляла 8-33%. С 2017 г. доля живой фитомассы в структуре общей фитомассы горевших сообществ постепенно начала приближаться к контрольным значениям. Доля живой фитомассы в горевших сообществах в начале вегетации колебалась в диапазоне 33-49%, в контрольных сообществах – 15-38%; в конце вегетационного сезона доля живой фитомассы в первых составляла 12-35%, во вторых – 8-29%. В начале вегетации 2018 г. доля живой фитомассы горевших площадок составляла 15-43%, в контрольных – 15-30%; в конце вегетации доля живой фитомассы первых сообществ составляла 11-36%, вторых – 6-25%. В 2019 году тенденция на приближение к значениям контрольных сообществ усилилась; в горевших сообществах доля живой фитомассы в начале вегетации составляла 19-36%, в контрольных 17-22%. К концу вегетационного сезона в горевших сообществах доля колебалась в диапазоне 6-30%, на контрольных площадках – 7-20%. На шестой год после пожара (2020 г.) доля и ход сезонной динамики живой фитомассы горевших сообществ приближались к контрольным сообществам. Так, доля живой фитомассы от общих запасов фитомассы в контрольных сообществах составляла 7-35%, а в горевших – 13-45%. Но, несмотря на то что год от года доля живой фитомассы горевших сообществ снижалась и приближалась к контролю, она всегда была больше доли контрольных сообществ.

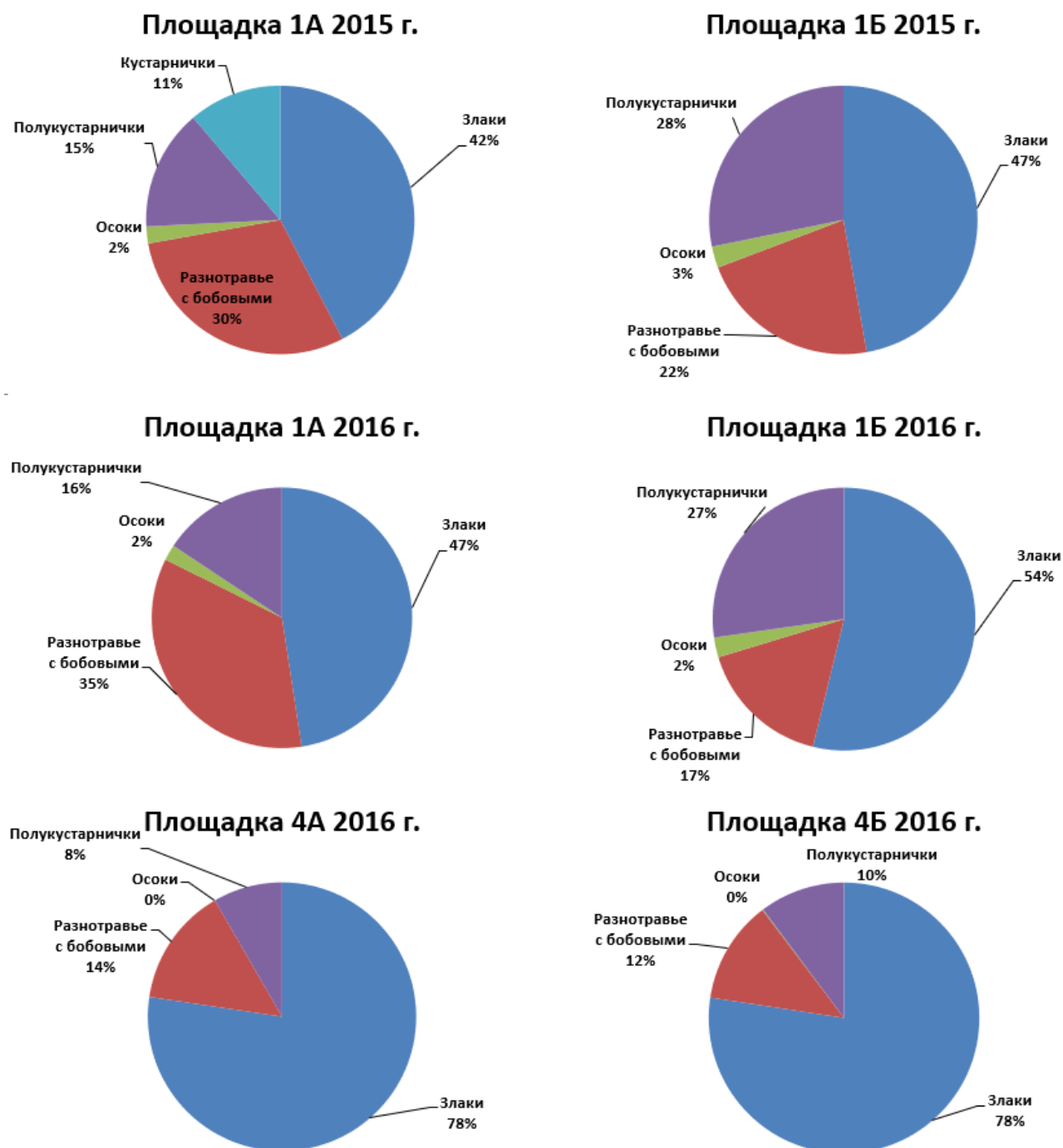
*Восстановление живой надземной фитомассы.* Учитывая, что восстановление общих запасов живой фитомассы происходит уже на второй год после пожара (Dusaeva et al., 2019), а живой фитомассы злаков на антропогенно нарушенных участках – на третий, можно говорить о восстановлении этого показателя в таких биотопах за счет других агроботанических групп. В данном случае происходит не качественное, а количественное восстановление запасов общей живой фитомассы.

Различия в запасах общей живой фитомассы между горевшим и контрольным сообществом на участке № 1 в 2015 г. были подтверждены статистически. При этом запасы живой фитомассы злаков, разнотравья и полукустарников статистически достоверно не отличались. Различия в значениях общих запасов живой фитомассы достигались за счет кустарничков (*Ephedra distachya* L.), доля которых в горевшем сообществе составляла 11% от всей живой фитомассы, а в контрольном сообществе они отсутствовали (рис. 5). Уже в 2016 г. на этом участке не были выявлены статистически значимые различия в общих запасах живой фитомассы, тогда как они появились в запасах живой фитомассы злаков. В данном случае, несмотря на различия в значениях запасов живой фитомассы злаков, сходство в количестве живой фитомассы в целом достигалось за счет разнотравья. Запасы живой фитомассы последнего на горевшей площадке составляли 35% от общих запасов живой фитомассы за год, а на контроле – 16% (рис. 5).

В этот же период (2016 г.) на участке № 4 складывались условия, при которых запасы живой фитомассы, запасы живой фитомассы разнотравья и полукустарничков статистически значимо не различались, различались лишь запасы живой фитомассы злаков (доминантов фитоценоза). В контрольном фитоценозе при стабильных запасах живой фитомассы, мобильнее всего были запасы живой фитомассы разнотравья и полукустарничков. При этом в контрольном сообществе наблюдалось резкое сокращение (почти в 2-3 раза) последних в сентябре, а на горевших площадках эти запасы флюктуировали незначительно в течение вегетационного сезона.

### Выводы

В ходе многолетних наблюдений было установлено, что общие запасы живой надземной фитомассы восстанавливаются по массе на второй год после пожара. При этом статистически значимые различия ее количества в горевших и негоревших фитоценозах уже в первый год отсутствуют на ненарушенных участках и сохраняются только на ранее подвергавшихся воздействию (залежи, перевыпас).



**Рис. 5.** Сравнение доли жизненных форм на горевших (А) и контрольных (Б) площадках участков № 1 и 4.

После выгорания ход сезонного изменения запасов живой надземной фитомассы становится единообразным (особенно в первые годы), несмотря на различия фитоценозов. В то же время этот показатель на негоревших участках изменяется по разной траектории в разных фитоценозах. Сходство в пиковых значениях накопления живой надземной фитомассы наблюдается с третьего года после пожара. При этом выделяются два типа динамики, проявляющиеся в разные годы: 1) накопление живой фитомассы в начале вегетационного сезона и снижение – в конце; 2) наличие двух пиков накопления – в начале вегетационного сезона и в позднелетний период.

Диапазон доли запасов живой надземной фитомассы от общих запасов фитомассы в выборке из всех горевших фитоценозах значительно отличается от диапазона в выборке из всех негоревших



только в первые два года после пожара, а с третьего года они начинают сравниваться. Однако это не может трактоваться как признак полного восстановления сообществ, поскольку в парах «гарь–контроль» доля запасов живой надземной фитомассы от общих запасов фитомассы за весь период исследования всегда больше в горевших сообществах, чем в контрольных.

Установлено, что тренд на снижение запасов живой надземной фитомассы, выявленный для некоторых участков, определяется уменьшением запасов живой фитомассы злаков. Он не зависит от влияния последствий пожара, т.к. проявляется на горевших и негоревших площадках.

Отмечены случаи, при которых, несмотря на статически доказанное восстановление общих запасов живой надземной фитомассы в первые годы после пожара до значений, сходных с контрольными, структура живой надземной фитомассы в горевших фитоценозах отличается по массе или доле разных жизненных форм. Таким образом, происходит не качественное, а лишь количественное восстановление живой надземной фитомассы.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках государственного задания Института степи Уральского отделения РАН "Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем" (проект № ГР АААА-А21-121011190016-1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Смирнов В.В., Родин Л.Е., Нечаева Н.И., Левин Ф.И. 1978. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М.: Мысль. 183 с.
- Блохин Е.В. 1997. Экология почв Оренбургской области: Почвенные ресурсы, мониторинг, агро-экологическое районирование. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. 228 с.
- Дубинин М.Ю., Луцкина А.А., Раделоф Ф.К. 2010. Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных земель) // Аридные экосистемы. № 16 (3). С. 5-16.
- Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. Карта для высших учебных заведений. М 1:8 000 000. 1999а. / Ред. Г.Н. Огуреева. М. 2 л.
- Зоны и типы поясности. 1999б. / Ред. Г.Н. Огуреева. Пояснительный текст и легенда к карте М 1:8 000 000. М. 64 с.
- Иванов В.В. 1958. Степи западного Казахстана в связи с динамикой их покрова. М., Л.: Изд-во АН СССР. 288 с.
- Калмыкова О.Г. 2008. Закономерности распределения степной растительности «Буртинской степи» (Госзаповедник «Оренбургский»). Дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16. СПб. 230 с.
- Климентьев А.И., Чибилев А.А., Блохин Е.В., Грошев И.В. 2001. Красная книга почв Оренбургской области. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. 295 с.
- Кобечинская В.Г., Андреева О.А. 2018. Сравнительная характеристика структуры и продуктивности фитоценозов восточных и центральных степей Крыма с учетом пирогенного фактора // Экосистемы. № 15 (45). С. 3-11.
- Мирошниченко Ю.М. 1971. Влияние выжигания на тырсовые степи в МНР // Ботанический журнал. Т. 56. № 6. С. 857-863.
- Опарин М.Л., О.С. Опарина 2003. Влияние палов на динамику степной растительности // Приволжский экологический журнал. № 2. С. 158-171.
- Павлейчик В.М. 2015. Пространственно-временная структура пожаров на заповедном участке «Буртинская степь» // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. № 4. С. 1-12.
- Павлейчик В.М. 2016. Многолетняя динамика природных пожаров в степных регионах (на примере Оренбургской области) // Вестник ОГУ. № 6 (194). С. 74-80.
- Родин Л.Е. 1981. Пирогенный фактор и растительность аридной зоны // Ботанический журнал. Т. 66. № 12. С. 1673-1684.
- Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. 1968. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука. 143 с.
- Сафронова И.Н., Калмыкова О.Г. 2012. Вопросы зональности и роль заповедников в их решении // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 14. № 1(6). С. 1638-1641.
- Степной заповедник «Оренбургский»: физико-географическая и экологическая характеристика. 1996 / Ред. А.А. Чибилёв. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. 167 с.
- Степные пожары и управление пожарной ситуацией в степных ООПТ: экологические и природоохранные аспекты. Аналитический обзор. 2015 / Ред. И.Э. Смелянский. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы. 144 с.

- Титлянова А.А., Самбуу А.Д. 2016. Сукцессии в травяных экосистемах. Новосибирск: Издательство СО РАН. 191 с.
- Ткачук Т.Е. 2015. Динамика площадей степных пожаров на юге Даурии в первом десятилетии XXI века // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия: Естественные науки. № 1 (60). С. 72-79.
- Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья. 992 с.
- Шинкаренко С.С. 2015. Пространственно-временной анализ степных пожаров в Приэльтонье на основе данных ДЗЗ // Вестник Волгоградского государственного университета. №1 (11). С. 87-94.
- Шинкаренко С.С. 2018. Оценка динамики площадей степных пожаров в Астраханской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15 (1). С. 138-146.
- Шинкаренко С.С., Берденгадиева А.Н. 2019. Анализ многолетней динамики степных пожаров в Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 16 (2). С. 98-110.
- Шинкаренко С.С., Иванов Н.М., Берденгадиева А.Н. 2021. Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока Европейской России // Заповедная наука. Т. 6 (3). С. 23-44.
- Юнусбаев У.Б., Абдулина К.Х. 2010. Влияние разных сроков пала на отрастание надземной фитомассы степей Башкирского Зауралья // Экология. № 1. С. 63-65.
- Dhillon S.S., Anderson R.C. 1994. Production on burned and unburned sand prairies during drought and nondrought years // *Vegetatio*. № 115(1). P. 51-59.
- Dusaeva G.Kh., Kalmykova O.G., Dusaeva N.V. 2019. Fire influence on dynamics of above-ground phytomass in steppe plant communities in the Burtinskaya Steppe (Orenburg State Nature Reserve, Russia) // *Nature Conservation Research*. Vol. 4 (Suppl. 1). P. 78-92.
- Fuhlendorf S.D., Engle D.M. 2004. Application of the firegrazing interaction to restore a shifting mosaic on tallgrass prairie // *Journal of Applied Ecology*. № 41(4). P. 604-614.
- Kalmykova O.G., Dusaeva G.K., Maksutova N.V. 2019. Early Postfire Vegetation Dynamics of Shrub-steppe Communities (On the example of Burtinskaya Shrub-steppe of Orenburg Nature Reserve) // *KnE Life Sciences*. Vol. 4 (14). P. 946-955.
- Pereira P., Cerda A., Lopez A.J., Zavala L.M., Mataix-Solera J., Arcenegui V., Misiune I., Keesstra S., Novara A. 2015. Vegetation recovery after a grassland fire in Lithuania. The effects of fire severity, slope position and aspect // *Land Degradation and Development*. № 27(5). P. 1523-1534.
- Valkó O., Deák B., Magura T., Török P., Kelemen A., Tóth K., Horváth R., Nagy D.D., Debnár Z., Zsigrai G., Kapocsi I., Tóthmérész B. 2016. Supporting biodiversity by prescribed burning in grasslands – a multi-taxa approach // *Science of the Total Environment* № 572. P. 1377-1384.

УДК 581.5 (575.13)

**СОСТОЯНИЕ ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ *XYLOSALSOLA CHIWENSIS* (POPOV)  
AKHANI & ROALSON И *SCORZONERA BUNGEI* KRASCH. & LIPSCH.  
НА ПЛАТО УСТЮРТ (УЗБЕКИСТАН)**

© 2023 г. Н.К. Рахимова, Т. Рахимова, Х.Ф. Шомуродов, В.К. Шарипова

*Институт ботаники АН Республики Узбекистан*

*Узбекистан, 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, д. 32. E-mail: rakhimovanodi@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 10.01.2023. Принята к публикации 13.01.2023.

Проведение экологического мониторинга, охрана редких видов растений, а также исследования для оценки состояния популяций редких и исчезающих видов с использованием ценопопуляционных подходов являются первоочередными задачами, как и сохранение растительных сообществ с их участием. Целью исследования явилось изучение эколого-фитоценотической приуроченности ценопопуляций редких видов Устюрта *Xylosalsola chiwensis* и *Scorzonera bungei*, занесенных в Красную книгу Республики Узбекистан (2019). Дана характеристика растительных сообществ с участием ценопопуляций исследованных видов. Изучена онтогенетическая структура данных видов. Результаты показали, что в эколого-ценопопуляционных условиях Устюрта изученные ценопопуляции нормальные, неполночленные. Базовый онтогенетический спектр – центрированный, с пиком на средневозрастные генеративные особи. Спектры конкретных ценопопуляций – центрированный и левосторонний, что связано с экологическими условиями обитания и колебаниями погодных условий. При развитии отгонного животноводства и планировании линейных инфраструктур необходимо продолжать охрану данных видов. Полученные результаты будут использованы в последующих изданиях Красной книги Республики Узбекистан.

*Ключевые слова:* *Xylosalsola chiwensis*, *Scorzonera bungei*, Аральское море, плато Устюрт, биоразнообразие, онтогенетическая структура, ценопопуляция.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-77-84**

**EDN: ZUUMIF**

Актуальность изучения редких и находящихся под угрозой исчезновения видов растений определяется важностью задач их сохранения как элементов биоразнообразия. Разрешение проблемы сохранения биоразнообразия возможно на основе всестороннего изучения редких и исчезающих видов растений, их биоэкологических особенностей, жизненной стратегии выживания. Такие исследования необходимы при решении практических задач охраны редких и хозяйственно ценных видов растений, а также для рационального использования естественных сообществ и создания искусственных растительных сообществ (Бакташева, Инджеева, 2014).

Ценопопуляционный подход является наиболее оптимальным методом для оценки современного состояния популяций редких и находящихся под угрозой исчезновения видов. Подобные исследования широко применяются в России, Беларуси, на Украине, в странах Прибалтики, в т.ч. в Средней Азии. В Узбекистане планомерные исследования по оценке состояния популяций редких и исчезающих видов с использованием ценопопуляционных подходов начались в недалёком прошлом. С 2012 года сотрудники лаборатории Геоботаники Института ботаники Академии наук Республики Узбекистан ведут исследования по выявлению редких, нуждающихся в охране растительных сообществ, распространенных в растительном покрове Узбекистана (в т.ч. на плато Устюрт), оценке их современного состояния и разработке мер защиты.

*Территория исследования.* Плато Устюрт представляет собой пустынную, безводную глинистую равнину, расположенную на территории трех Центральноазиатских государств – Узбекистан, Казахстан и Туркменистан. Почти со всех сторон плато ограничено обрывами или чинками. На севере Устюрт граничит с Прикаспийской низменностью, на востоке – с осушенным дном Аральского моря, на юге – с дельтой Амударьи и Сарыкамышской впадиной, на западе –

с Каспийским морем. Общая площадь Устюрта составляет 21.2 млн. га, из неё на Каракалпакскую часть приходится 7.2 млн. га.

Растительный мир плато Устюрт исчисляется 724 видами, относящимися к 295 родам и 60 семействам (Сарыбаев, 1994). Основу растительного покрова составляют немногие виды, образующие монодоминантные сообщества: *Salsola arbusculiformis*<sup>1</sup>, *Anabasis salsa*, *Artemisia terraealba*, *Haloxylon aphyllum*, *Salsola orientalis*. Реже доминантами и субдоминантами растительных сообществ являются *Salsola arbuscula*, *Atraphaxis spinosa*, *Stipa richteriana*, *S. hohenackeriana*, *S. gemmascens*, *Nanophyton erinaceum*. Среди эндемиков, встречающихся на Устюрте и осушенном дне Аральского моря, можно указать эндемиков гипсовых пустынь *Salsola chivensis* и *Sisymbrium subspinenscens*, а также *Crataegus korolkowii*, *Artemisia austriaca*, *Atriplex pratovii* и *Crambe edentula*. К видам, внесенным в Красную книгу Узбекистана (2019), относятся мягкоплодный критмолистный (*Malocarpus crithmifolius*), климакоптера птилоптера (*Climacoptera ptiloptera*), молочай твердокальчатый (*Euphorbia sclerocyathium*) и солянка хивинская (*Xylosalsola chivensis*). Видовой состав Каракалпакского Устюрта еще не в полной мере изучен.

Несмотря на то что Устюрт является самым малозаселенным регионом Узбекистана (2.3 чел./км<sup>2</sup>), с началом индустриального развития постоянно усиливается антропогенная нагрузка на естественные биоценозы региона. В настоящее время основными видами хозяйственной деятельности на узбекской части плато являются нефтегазовая и химическая отрасли, железная и автомобильная дороги, животноводство, лесоводство и рыболовство. Кроме того, Устюрт испытывает влияние со стороны Аральского моря. Аральское море является своего рода естественным терморегулятором. Испаряемая им влага повышает влажность воздуха на расстоянии 350-400 км. Снижение уровня моря отразилось на биоразнообразии региона в различной степени, но наиболее сильно страдают мезофильные виды.

В сложных экологических условиях Устюрта интересно изучение эколого-фитоценотического состояния ценологических популяций редких видов – *Xylosalsola chivensis* и *Scorzonera bungei*. Имеется ряд статей, посвященных современным состояниям редких видов в условиях Кызылкума и на плато Устюрт (Rakhimova et al., 2020; Shomurodov et al., 2020; Rakhimova et al., 2021a, б; Saribaeva et al., 2022).

Род *Salsola* L. (Солянка) представлен однолетниками, полукустарниками, кустарниками и небольшими деревьями. В роде около 120 видов, кормовые сведения имеются в отношении 43 видов (Ларин и др., 1951). Представители данного рода распространены в полупустыне и пустыне, и только немногие виды произрастают в лесостепи и степи. Солянки содержат до 10-12% протеина. Поедаются солянки лучше всего осенью и зимой, более охотно – верблюдами и мелким скотом, хуже – лошадьми и другими животными. Во флоре Средней Азии род *Salsola* представлен 60 видами (Хасанов, 2015), из которых 48 произрастает на территории Узбекистана (Флора Узбекистана, 1953). *Xylosalsola chivensis* как реликтовый вид Северного Узбекистана со статусом 2 занесен в Красную книгу Узбекистана (2019).

Род *Scorzonera* L. (Козелец) насчитывает 175 видов, распространенных от Средней Европы и Средиземноморской области до Восточной Азии. Виды рода особенно многочисленны в Иране, Малой Азии, на Кавказе и Средней Азии, приурочены к аридным экологическим условиям (Makbul et al., 2011). Представители рода *Scorzonera* имеют габитус с преобладанием многолетних трав, реже – двулетников, полукустарников и полукустарничков (Тагаев, 2019). Все виды являются ценными кормовыми растениями, хорошо поедаемыми любыми видами скота. Вредных и ядовитых растений среди них не имеется. Корни богаты крахмалистыми веществами и употребляются в пищу. Некоторые виды содержат каучук (Ларин и др., 1952). По последним данным Ф.О. Хасанова (2015), в Средней Азии произрастают 33 вида, из них в Узбекистане – 17 (Флора Узбекистана, 1962). *Scorzonera bungei* как редкий эндемик Кызылкума со статусом 2 также занесен в Красную книгу Узбекистана (2019).

Онтогенетическая структура ценопопуляций исследованных в данной работе видов ранее никем и нигде не была изучена, в т.ч. и на плато Устюрт.

---

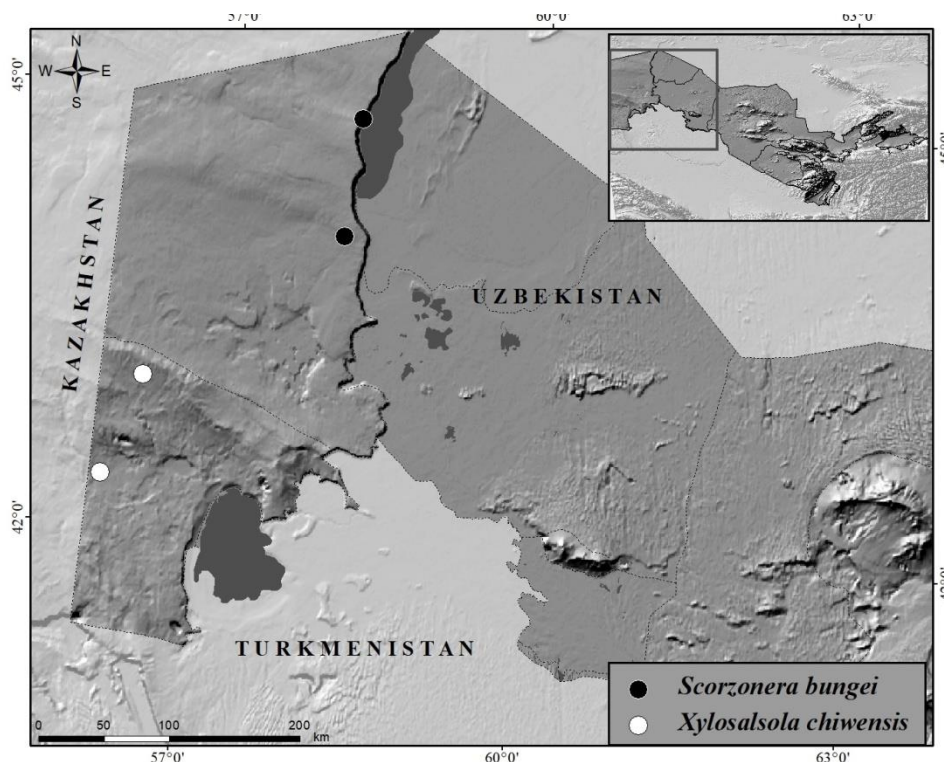
<sup>1</sup> Латинские названия видов растений приводятся в соответствии с международной таксономической базой данных POWO Plants of the World Online (2002).

### Объекты и методы

Объектами исследования являлись редкие виды, занесенные в Красную Книгу Республики Узбекистан (2019) – *Xylosalsola chiwensis* и *Scorzonera bungei* (рис. 1).

*Xylosalsola chiwensis* (солянка хивинская) из сем. *Amaranthaceae* – это полукустарник высотой 30-60 см. Встречается на плато Устюрт и в Кызылкумах. За пределами Узбекистана – в Туркменистане. Растет на серо-бурых гипсованных и мергелистых почвах. Встречается как единично, так и в зарослях. Размножение – семенное. Причины изменения численности и ареала: выпас скота, скотопрогон. В Каракалпакии является кормовым растением (Ережепов, 1978).

Изученный нами второй вид *Scorzonera bungei* (козелец Бунге) из сем. *Asteraceae* – это многолетнее травянистое растение, эфемероид высотой до 10-12 см. Распространен в Каракалпакистане, Кызылкуме, останцовых горах Султан-Увайсдаг на каменистых склонах и скалах останцовых гор. Размножение – семенное. Произрастает на склонах, где за счет весенних потоков происходит элиминация молодой фракции растений семенного происхождения.



**Рис. 1.** Карта распространения *Xylosalsola chiwensis* и *Scorzonera bungei* на Устюрте (в пределах Каракалпакистана, Узбекистан).

Климат Устюрта резко континентальный, характеризуется жарким сухим летом и довольно суровой зимой, сопровождающейся сильными ветрами, малым количеством атмосферных осадков, высокой испаряемостью и резкой сменой температур по сезонам года и в течение суток. Абсолютная максимальная температура – +45.5°C (июль), минимальная – -37.0°C (январь). Среднее годовое количество осадков не превышает 120 мм. С ухудшением экологических условий наблюдаются продолжительные суровые зимы и жаркое сухое лето. Количество атмосферных осадков по сравнению с 1970-1980 годами уменьшилось на 20-30 мм. Засоленность почвы повысилась в 1.2-1.5 раза (Rakhimova et al., 2020).

Геоботанические описания сделаны во всех сообществах, где изучали популяционную структуру видов, по общепринятой методике (Полевая геоботаника, 1964). При идентификации видовой принадлежности растений использовали «Определитель высших растений Каракалпакии» (Бондаренко, 1964). Для каждой ценопопуляции было заложено 3 трансекты, длиной 10 м, шириной 1 м, разделенные на площадки по 1 м<sup>2</sup>. Онтогенетическую структуру ценогенетических популяций

рассчитывали, как соотношение особей с разным онтогенетическим состоянием. У *S. bungei* в качестве счетной единицы принималась особь, у *X. chiwensis* – парциальный куст. При характеристике структуры популяции опирались на представление о характерном онтогенетическом спектре (Заугольнова, 1994). По характеру распределения онтогенетических групп выделяют 4 типа спектров: левосторонний, центрированный, правосторонний и бимодальный. Характерный спектр зависит от биологических особенностей вида. Ценопопуляции описывали согласно классификациям А.А. Уранова и О.В. Смирновой (1969), тип ценопопуляции – по классификации «дельта-омега» ( $\Delta$ - $\omega$ ) Л.А. Животовского (2001), в соответствии с которой они могут быть молодыми, зреющими, переходными, стареющими и старыми. Для построения карты расположения изученных ценопопуляций исследуемых видов координаты местонахождений были импортированы в географическую информационную систему ESRI ArcGIS ArcView v.10.0 (2020).

В ходе полевых экспедиций, организованных в 2019-2021 гг. на плато Устюрт, наряду с другими редкими видами (*Malacocarpus crithmifolius*, *Euphorbia sclerocyathium*, *Astragalus holargyreus*, *Crambe edentula*, *Lagochilus acutilobus*, *Crataegus korolkowii*) было оценено современное состояние видов *Xylosalsola chiwensis* и *Scorzonera bungei*.

### Результаты и обсуждение

На плато Устюрт выявлено два сообщества с участием *X. chiwensis*. Ниже дается краткая эколого-фитоценотическая характеристика данных ценопопуляций (ЦП).

В районе Карабаур в составе полынно-боялышевом сообществе *X. chiwensis* встречается как участник сообщества (43° 06' 44" с.ш., 56° 40' 11" в.д.). Почва описываемой территории – супесчаная, местами встречаются материнские породы. Первая ЦП растет вдоль сухой речки, где в растительном сообществе доминантами и субдоминантами являются *Salsola arbusculiformis*, *Artemisia diffusa* и *Convolvulus fruticosus*. Проективное покрытие травостоя – 20%. Ботанический состав сообщества состоит из 12 видов цветковых растений. Вторая ЦП исследуемого вида найдена из района Шахбахты, в 5 км к северо-востоку от скважин, в составе кандымово-полынного сообщества (42° 37' 51" с.ш., 56° 01' 94" в.д.). Почва описываемой территории – супесчаная, рельеф ровный. В растительном сообществе преобладает *Artemisia terrae-albae*. Проективное покрытие травостоя составляет 25%, а доля исследуемого вида в нем – 1%. Здесь зарегистрировано 11 видов (табл. 1).

Для оценки состояния ЦП в различных местообитаниях изучена онтогенетическая структура двух ЦП *X. chiwensis*. По классификации А.А. Уранова и О.В. Смирновой (1969), изученные ценопопуляции *X. chiwensis* нормальные, но неполночленные. В ЦП 1 из прегенеративных отсутствуют только ювенильные, но другие прегенеративные присутствуют, а в ЦП 2 вообще отсутствуют все прегенеративные; также в обеих ЦП отсутствуют старые генеративные и сенильные особи. В ЦП 1 общее количество особей насчитывается 18, а в ЦП 2 данный показатель составляет 12 штук. Средняя плотность особей невысокая, встречаемость видов на 1 м<sup>2</sup> площади составляет 1.0 шт. в ЦП 1 и 0.6 шт. в ЦП 2. Отсутствие в ЦП 2 прегенеративной фракции связано с экологическими условиями обитания (засушливым климатом, сильным ветром и засолением почвы). Другой фактор, определяющий отсутствие особей молодой фракции в годы обследований, – нерегулярность семенного возобновления вида. Обе изученные ЦП имеют одинаковый тип онтогенетического спектра – центрированный (рис. 2). Накопление средневозрастных генеративных растений в ЦП связано с продолжительным развитием и наименьшей элиминацией особей данной онтогенетической группы. По нашим наблюдениям, для *X. chiwensis* характерны слабое семенное размножение и длительное пребывание в средневозрастном генеративном состоянии. Данные биологические состояния позволяют считать, что характерным спектром ЦП этого вида является центрированный. Онтогенетические спектры обеих ЦП совпадают с характерным.

Для выявления типов ЦП были оценены возрастность и эффективность ценопопуляции *X. chiwensis*. Первая ЦП *X. chiwensis*, исходя из соотношения значения дельта-омега, оценивается как зреющая ( $\Delta = 0.30$ ;  $\omega = 0.71$ ), вторая – как зрелая ( $\Delta = 0.42$ ;  $\omega = 0.92$ ).

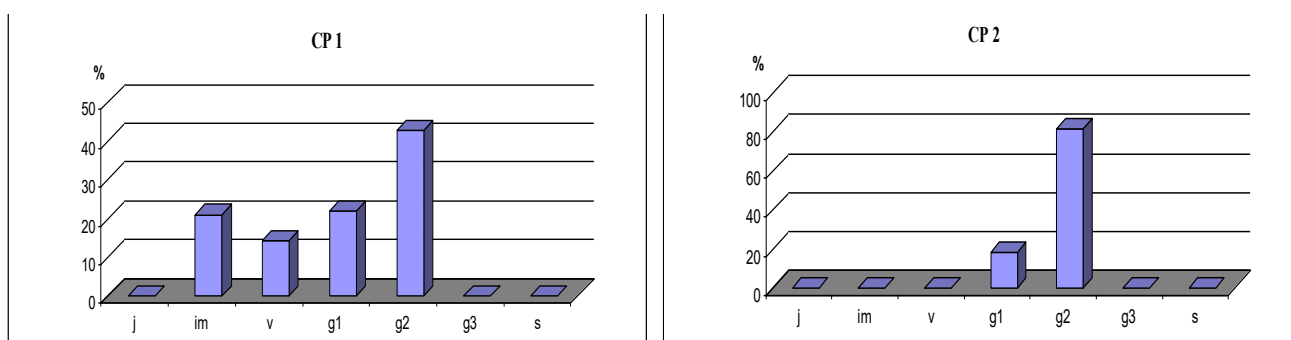
Также нами выявлены 2 ЦП *S. bungei*. Ниже приводится краткая эколого-фитоценотическая характеристика данных ЦП.

Первая ЦП выявлена в районе Актумсук в составе боялышево-полынного сообщества (44° 14' 50" с.ш., 58° 16' 14" в.д.). Почва описываемого участка – супесчаная. Проективное покрытие

травостоя составляет 15%. Флористический состав сообщества складывается из 18 видов сосудистых растений, где преобладают особи *Salsola arbusculiformis* и *Artemisia terrae-albae*. Субдоминантами являются *Anabasis brachiata*. Вторая ЦП выявлена в районе Жийделибулак в составе курчавково-чернобоялышево-полынном сообществе (44° 96' 30" с.ш., 58° 23' 00" в.д.). Здесь почва также супесчаная. Общее проективное покрытие травостоя заметно выше по сравнению с ЦП 1 и составляет 30%. Здесь зарегистрировано 13 видов. В травостое преобладают особи *Artemisia terrae-albae*, *Salsola arbusculiformis* и *Atraphaxis spinosa*. В обоих сообществах исследуемый вид встречается как участник сообщества (табл. 2).

**Таблица 1.** Характеристика растительных сообществ с участием исследованных ценопопуляций *Xylosalsola chiwensis*.

№ п/п	Виды растений	Жизненная форма	Проективное покрытие видов, %	
			ЦП 1	ЦП 2
1	<i>Haloxyton ammodendron</i> (C.A. Mey.) Bunge ex Fenzl	дерево	-	1
2	<i>Salsola arbusculiformis</i> Drobow	кустарник	8	+
3	<i>Convolvulus fruticosus</i> Pall.	кустарник	4	-
4	<i>Astragalus ammodendron</i> Bunge	кустарник	1	-
5	<i>Calligonum leucocladum</i> (Schrenk) Bunge	кустарник	-	3
6	<i>Xylosalsola chiwensis</i> (Popov) Akhani & Roalson	полукустарник	+	1
7	<i>Haplophyllum obtusifolium</i> (Ledeb. ex Eichw.) Ledeb.	полукустарник	+	-
8	<i>Artemisia diffusa</i> Krasch. ex Poljakov	полукустарничек	5	-
9	<i>Artemisia terrae-albae</i> Krasch.	полукустарничек	-	20
10	<i>Limonium suffruticosum</i> (L.) Kuntze	многолетник	1	-
11	<i>Zosima absinthiifolia</i> (Vent.) Link	многолетник	+	-
12	<i>Onosma staminea</i> Ledeb.	многолетник	+	-
13	<i>Eremopyrum orientale</i> (L.) Jaub. & Spach	многолетник	+	-
14	<i>Leontice inserta</i> Pall.	многолетник	+	-
15	<i>Anabasis brachiata</i> Fisch. & C.A. Mey. ex Kar. & Kir.	многолетник	-	+
16	<i>Stipa caucasica</i> Schmalh.	многолетник	-	+
17	<i>Euphorbia sclerocyathium</i> Korovin & Popov	многолетник	-	+
18	<i>Eremopyrum bonaepartis</i> (Spreng.) Nevski	однолетник	-	+
19	<i>Ranunculus falcatus</i> L.	однолетник	+	+
20	<i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	однолетник	-	+



**Рис. 2.** Онтогенетические спектры ценопопуляций *Xylosalsola chiwensis*. Условные обозначения: j – ювенильные особи, im – имматурные особи, v – виргинильные особи, g1 – молодые генеративные особи, g2 – средневозрастные генеративные особи, g3 – старовозрастные генеративные особи, s – сенильные особи.

По классификации А.А. Уранова и О.В. Смирновой (1969), изученная ценопопуляция *S. bungei* – нормальная, но не полночленная. В ЦП 1 отсутствуют ювенильные и сенильные особи. В ЦП 1 общее количество особей – 16, а в ЦП 2 данный показатель составляет 22. Средняя плотность особей равна 0.8 в ЦП 1 и 1.1 в ЦП 2 шт. на 1 м<sup>2</sup>. Исходя из особенностей биологии вида (низкой всхожести семян, быстрого перехода к цветению и замедленных темпов развития особей в средневозрастном генеративном состоянии), можно сказать, что характерным спектром ценопопуляций этого вида будет центрированный тип с пиком на средневозрастные генеративные особи. Отсутствие в онтогенетическом спектре ЦП 1 ювенильных особей связано с тем, что в этой ЦП доминировали особи вегетативного происхождения и она произрастала на склоне, где за счет весенних потоков происходит элиминация молодой фракции растений семенного происхождения. Онтогенетический спектр исследованной ЦП совпадает с характерным: он центрированный с абсолютным максимумом на особях средневозрастного генеративного состояния. Доля особей этой возрастной группы в ЦП составляет 37.5% (рис. 3). Преобладание зрелых генеративных особей в ценопопуляции связано, с одной стороны, с постепенным увеличением продолжительности жизни особей в данном онтогенетическом состоянии, а с другой, с высокой элиминацией особей в ювенильном и иматурном состояниях вследствие недостатка влаги.

**Таблица 2.** Характеристика растительных сообществ с участием исследованных ценопопуляций *Scorzonera bungei*.

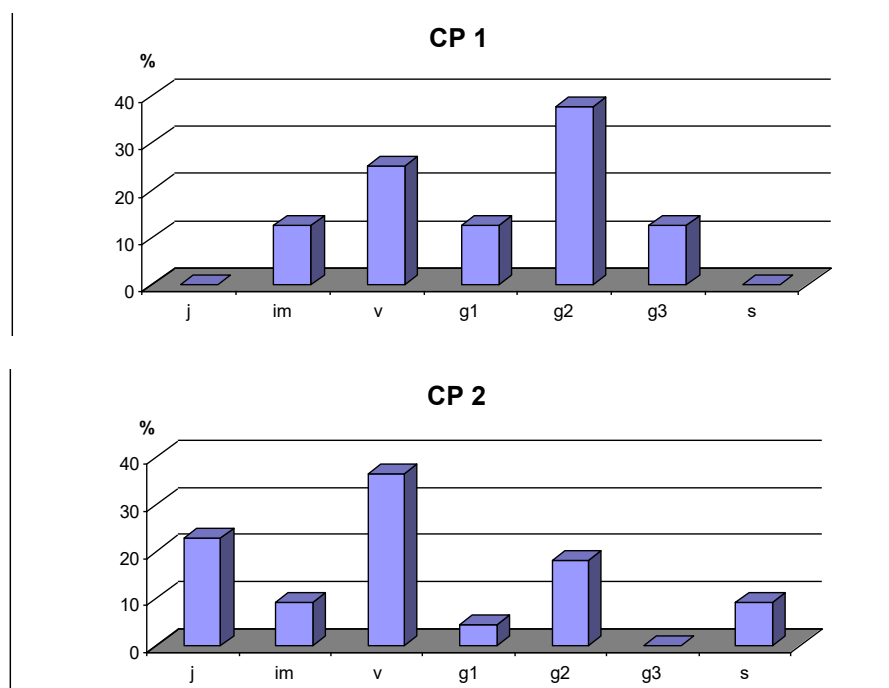
№ п/п	Виды растений	Жизненная форма	Проективное покрытие видов, %	
			ЦП 1	ЦП 2
1	<i>Haloxylon persicum</i> Bunge	дерево	+	-
2	<i>Salsola arbusculiformis</i> Drobow	кустарник	4	8
3	<i>Nitraria sibirica</i> Pall.	кустарник	1	-
4	<i>Atraphaxis spinosa</i> L.	кустарник	-	5
5	<i>Artemisia terrae-albae</i> Krasch.	полукустарник	6	10
6	<i>Krascheninnikovia ceratoides</i> (L.) Gueldenst.	полукустарник	1	-
7	<i>Anabasis salsa</i> (Ledeb.) Benth. ex Volkens	полукустарник	+	3
8	<i>A. brachiata</i> Fisch. & C.A. Mey. ex Kar. & Kir.	многолетник	2	-
9	<i>Astragalus erioceras</i> Fisch. & C.A. Mey. ex Ledeb.	многолетник	-	+
10	<i>Zygophyllum turcomanicum</i> Fisch. ex Boiss.	многолетник	+	-
11	<i>Scorzonera bungei</i> Krasch. & Lipsch.	многолетник	+	+
12	<i>Haplophyllum obtusifolium</i> (Ledeb. ex Eichw.) Ledeb.	многолетник	+	-
13	<i>Lagochilus acutilobus</i> (Ledeb.) Fisch. & C.A. Mey.	многолетник	+	1
14	<i>Rheum tataricum</i> L.f.	многолетник	+	-
15	<i>Ferula caspica</i> M. Bieb.	многолетник	+	-
16	<i>Poa bulbosa</i> L.	многолетник	-	+
17	<i>Allium sabulosum</i> Steven ex Bunge	многолетник	-	+
18	<i>Onosma staminea</i> Ledeb.	многолетник	-	+
19	<i>Zosima absinthifolia</i> (Vent.) Link	многолетник	-	+
20	<i>Eremopyrum orientale</i> (L.) Jaub. & Spach	однолетник	+	1
21	<i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	однолетник	+	-
22	<i>Climacoptera lanata</i> (Pall.) Botsch.	однолетник	+	-
23	<i>Arnebia decumbens</i> (Vent.) Coss. & Kralik	однолетник	+	+
24	<i>Strigosella africana</i> (L.) Botsch.	однолетник	+	-

Проведенные исследования онтогенетической структуры изученных ЦП 2 – левосторонний, не совпадает с характерным. Высокая доля виргинильных особей (36.36%) в отдельных ценопопуляциях связана как с хорошим семенным возобновлением, так и с большей



продолжительностью жизни данного онтогенетического состояния в более сухих местообитаниях. В этих ценопопуляциях наблюдается постепенное увеличение доли определенной онтогенетической группы по сравнению с предыдущей, что связано с увеличением продолжительности нахождения особей в последующих состояниях и уменьшением количества отмирающих особей. Резкое снижение количества имматурных особей связано с отпадом неокрепших растений вследствие вытаптывания мелким рогатым скотом. Низкие показатели в онтогенетическом спектре сенильных особей – одна из биологических особенностей этого вида (рис. 3).

Для выявления типов ценопопуляций были оценены возрастность ( $\Delta$ ) и эффективность ( $\omega$ ) ценопопуляции *S. bungei*. ЦП 1 относится к зреющему ( $\Delta = 0.34$ ;  $\omega = 0.69$ ), а ЦП 2 молодому типу ( $\Delta = 0.24$ ;  $\omega = 0.41$ ).



**Рис. 3.** Центрированный (ЦП 1) и левосторонний (ЦП 2) онтогенетический спектр *Scorzonera bungei*. Условные обозначения на рисунке 2.

### Заключение

Таким образом, на основании структуры ценопопуляций двух редких видов Узбекистана *X. chiwensis* и *S. bungei*, произрастающих на плато Устюрт, оценено их современное состояние. Исследованные ценопопуляции *X. chiwensis* нормальные, но неполночленные из-за отсутствия фракции молодых особей. Об этом свидетельствуют и типы ценопопуляций, которые оценены как зреющая и зрелая. Базовый онтогенетический спектр – центрированный, с пиком на средневозрастные генеративные особи, совпадает с характерным. Сходство биологических особенностей у онтогенетических реальных спектров с характерным спектром свидетельствует о стабильном состоянии изученных ценопопуляций *X. chiwensis* на каракалпакской части Устюрта.

Исследованные ценопопуляции *S. bungei* нормальные, неполночленные, отсутствуют ювенильные и сенильные особи. Онтогенетический спектр ЦП 1 совпадает с характерным. Он центрированный с абсолютным максимумом на особях средневозрастного генеративного состояния. Это связано с постепенным увеличением продолжительности жизни особей в генеративном периоде и элиминацией особей в ювенильном состоянии. Онтогенетический спектр ЦП 2 левостороннего типа с абсолютным максимумом на особях виргинильных групп. Онтогенетический спектр данной ЦП не совпадает с характерным. Для *S. bungei* характерно: семенной и вегетативный способ самоподдержания ценопопуляций, длительное пребывание в средневозрастном генеративном состоянии. Эти биологические особенности позволяют считать, что характерный спектр

ценопопуляций этого вида – центрированный. При развитии отгонного животноводства и планировании линейных инфраструктур эти виды необходимо охранять и далее. Результаты будут использованы в очередных изданиях Красной книги Республики Узбекистан.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках проекта Ф5-ФА-0-13289 «Современные тенденции развития растительности и животного мира Устюрта в процессе опустынивания» и по Государственной программе (ПФИ-5) «Оценка современного состояния растительного покрова и пастбищных ресурсов Республики Каракалпакстан».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакташева Н.М., Инджеева Л.А.* 2014. К вопросу сохранения и восстановления редких и исчезающих видов растений рода *Iris* в республике Калмыкия. Евразийский Союз Ученых IV. Биологические науки. С. 68-69.
- Бондаренко О.Н.* 1964. Определитель высших растений Каракалпакии. Ташкент: Фан. 303 с.
- Ережепов С.Е.* 1978. Флора Каракалпакии и её хозяйственная характеристика, использование и охрана. Ташкент: Фан. С. 59.
- Животовский Л.А.* 2001. Онтогенетическое состояние, эффективная плотность и классификация популяции. Экология. № 1. 3-7.
- Заугольнова Л.Б.* 1994. Структура популяций семенных растений и проблемы их мониторинга. Автореф. дисс. док. наук по биол. СПб. 70 с.
- Красная Книга Республики Узбекистан. 2019. В 2-х томах. Растения. Ташкент: Chinor ENK. Т. 1, 243 с., Т. 2, 307 с.
- Ларин И.В., Агабабян Ш.М., Работнов Т.А., Ларина В.К., Касименко М.А., Любская А.Ф.* 1951, 1956. Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР. Т. II, III. Москва-Ленинград. 220 с., 660 с.
- Полевая геоботаника. 1964. Под. ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. Т. 3. Москва: Наука. 230 с.
- Сарыбаев Б.П.* 1994. Флора и растительность плато Устюрт и перспективы их использования: Автореф. дис. ... док. биол. наук. Ташкент. 48 с.
- Тагаев И.У.* 2019. О структуре вегетативных органов Среднеазиатских видов рода *Scorzonera* L. (Asteraceae) // Научный вестник НамГУ. № 4. С. 57-59.
- Уранов А.А., Смирнова О.В.* 1969. Классификация и основные черты развития популяций многолетних растений // Бюллетень МОИП. Отдел биологии. № 74 (2). С. 119-134.
- Флора Узбекистана. 1953, 1962. Редактор А.И. Введенский. Т. II, VI. Ташкент: АН УзССР. 262 с., 434 с.
- Хасанов Ф.О.* 2015. Определитель растений Средней Азии. Критический конспект флоры. Vol. XI. Ташкент: Фан. С. 233, 241.
- ArcGIS Pro. ESRI. 2020. [Электронный ресурс <http://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro> (дата доступа: 19.02.2020)].
- Makbul S., Coskuncelebi K., Beyazoglu O.* 2011. Notes on the stem anatomy of *Scorzonera* (Asteraceae) taxa from Northeast Turkey // Phytologia Balcanica. Vol. 17. No. 1. P. 113-121.
- Plants of the World Online. 2002 [Электронный ресурс <https://powo.science.kew.org/> (дата обращения 25 04 2013)].
- Rakhimova T., Rakhimova N.K., Shomurodov Kh.F., Abduraimov O.S.* 2020. Ontogenetic structure of rare plant species on the Usturt Plateau in Uzbekistan // Arid ecosystems. Vol. 10. No. 3. 238-243.
- Rakhimova N.K., Rakhimova T., Adilov B.A., Tamambetova Sh.B., Polvonov F.I.* 2021a. Current Condition of *Crambe edentula* Fisch. & C.A. Mey. ex Korsh. on the Usturt Plateau in Uzbekistan // Arid ecosystems. Vol. 11. No. 4. 377-382.
- Rakhimova T., Rakhimova N., Sharipova V., Beshko N., Hayitov R.* 2021b. Current state of coenopopulations of some rare endemic species in Navoi region, Uzbekistan. Ekológia (Bratislava) // Journal of the Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences. Vol. 40. No. 4. P. 357-363.
- Saribaeva Sh.U., Shomurodov Kh.F., and Abduraimov O.S.* 2022. Ontogenesis and ontogenetic structure of local populations of the *Astragalus holargyreus* Bunge (Fabaceae) of the narrow-local endemic of Kyzylkum // Arid ecosystems. Vol. 12. No. 1. 78-84.
- Shomurodov Kh., Abduraimov O., Rakhimova N., Sharipova V. and Khayitov R.* 2020. Demographic structure of Caryophyllaceae Juss. rare species coenopopulations in Uzbekistan. International Conferences "Plant Diversity: Status, Trends, Conservation Concept". BIO WEB of Conferences 24, P. 00081. [Электронный ресурс <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202400081> (дата обращения 25 04 2013)].

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ, ПУТИ МИГРАЦИИ  
И МЕСТА ЗИМОВКИ СЕРЫХ ЖУРАВЛЕЙ СЕВЕРНОГО ПОДМОСКОВЬЯ**

© 2023 г. Т.В. Свиридова\*, О.С. Гринченко\*\*, М. Викельски\*\*\*, Е.И. Ильяшенко\*

\*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН  
Россия, 119071, Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: t-sviridova@yandex.ru

\*\*Институт водных проблем РАН  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: olga\_grinchenko@mail.ru

\*\*\*Институт поведения животных Макса Планка  
Германия, 78315, г. Радольфцелль, ул. Обстберг, д. 1

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

Результаты трехлетнего слежения за снабженным GPS-GSM передатчиком серым журавлем позволили лучше понять географические связи, пути миграций и ключевые участки летнего пребывания и миграционных остановок особей этого вида, гнездящихся в центре европейской части России. Прослежены пролетные пути и места зимовки, выявлены ключевые и кратковременные места миграционных остановок в аридных районах Украины, в Турции, Израиле и Эфиопии. Установлено, что в разные годы журавль использовал разные места зимовки. Выявлено, что неполовозрелые журавли Дубненского предмиграционного скопления (Московская область) могут использовать территории, где формируются другие предотлетные скопления, в частности в Смоленской области. Отмечен факт успешного гнездования серого журавля в трехлетнем возрасте.

*Ключевые слова:* серый журавль, Дубненское предотлетное скопление, долина Хула, миграции в аридные регионы, спутниковое мечение.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-85-97**

**EDN: PXRFO**

Серый журавль (*Grus grus* Linnaeus, 1758) – широко распространенный вид, гнездящийся в водно-болотных угодьях различного типа в лесотундровой, лесной, лесостепной, степной и полупустынной зонах Евразии. Его зимовки расположены на юго-западе Европы, северо-западе и северо-востоке Африки, в Малой Азии, Индии, южном Китае и на севере Индокитая (Prange, Pyashenko, 2019).

В гнездовое время придерживается болот или заболоченных участков, рядом с которыми имеются подходящие для кормежки поля и луга. В конце лета и осенью формирует предмиграционные скопления численностью от 30 до 6000 особей для накопления энергетических запасов перед миграцией (Маркин, 2013). Осенью в год рождения птенцы улетают с мест гнездования на зимовку вместе с родителями, а первую весеннюю миграцию, как правило, совершают самостоятельно. Половозрелость наступает в 3-4 года, до достижения которой молодые журавли держатся группами в пределах гнездовой части ареала и на сопредельных территориях (Кондракова и др., 2021).

Серые журавли из европейской части ареала мигрируют, главным образом, по западноевропейскому, восточноевропейскому (балтийско-венгерскому) и русско-понтийскому пролетным путям (Prange, Pyashenko, 2019). Большинство размножающихся в Европе птиц мигрируют на короткие и средние расстояния, зимую на юго-западе Европы, в Турции и Израиле. Но часть птиц совершают перелеты и на дальние расстояния – например, в Эфиопию. Каждый пролетный путь к местам зимовок и обратно включает несколько ключевых мест миграционных остановок с благоприятными условиями для пополнения энергии (Prange, Pyashenko, 2019; Ojaste et al., 2020).

В европейской части России наиболее крупные предмиграционные скопления формируются в

Калининградской, Смоленской, Вологодской, Московской, Ивановской, Кировской областях и Республике Татарстан (Pyashenko, Markin, 2012). Серые журавли из этого региона используют три основных места зимовки на русско-понтийском миграционном пути – на северном побережье Средиземного моря в провинции Адана в Турции, в долине Хула на севере Израиля и на оз. Тана в Эфиопии (Prange, Pyashenko, 2019). По оценкам экспертов и данным о меченых особях, место зимовки в Израиле наиболее важно, так как там зимует более половины журавлей европейской части России (Маркин, 2013; Prange, Pyashenko, 2019; Pekarsky et al., 2021). В последние годы в связи с потеплением климата отмечено смещение мест зимовки на север. Часть птиц стала оставаться зимовать в Херсонской области Украины (Андрющенко и др., 2006) и на юге России – Ставропольском и Краснодарском краях (Лохман, Солоха, 2018; Маловичко, 2018).

На севере Московской области, в заказнике «Журавлиная родина» и на сопредельной территории, в настоящее время гнездятся от 71 до 85 пар серых журавлей, а с августа и до второй декады октября формируется Дубненское предмиграционное скопление, ежегодная численность птиц в котором составляет от 800 до 1330 особей (Гринченко, 2019). Изучение этой гнездовой группировки и предотлетного скопления начато в конце 1970-х гг., значительная часть полученных результатов опубликована (Зубакин и др., 1982; Smirnova et al., 1999; Гринченко и др., 2015, 2020).

Благодаря развитию современных технологий важным направлением исследований гнездовой биологии, путей миграции и мест зимовок журавлей и других видов птиц стало мечение цветными кольцами и спутниковыми передатчиками (Kays et al., 2015; Ильяшенко и др., 2020, 2021). В 2017 г. на территории предмиграционного скопления в заказнике «Журавлиная родина» три взрослых и один молодой серый журавль помечены индивидуальными комбинациями цветных колец. Данные о предполагаемом пути их миграции и встречах на зимовке в Израиле опубликованы ранее (Гринченко и др., 2018).

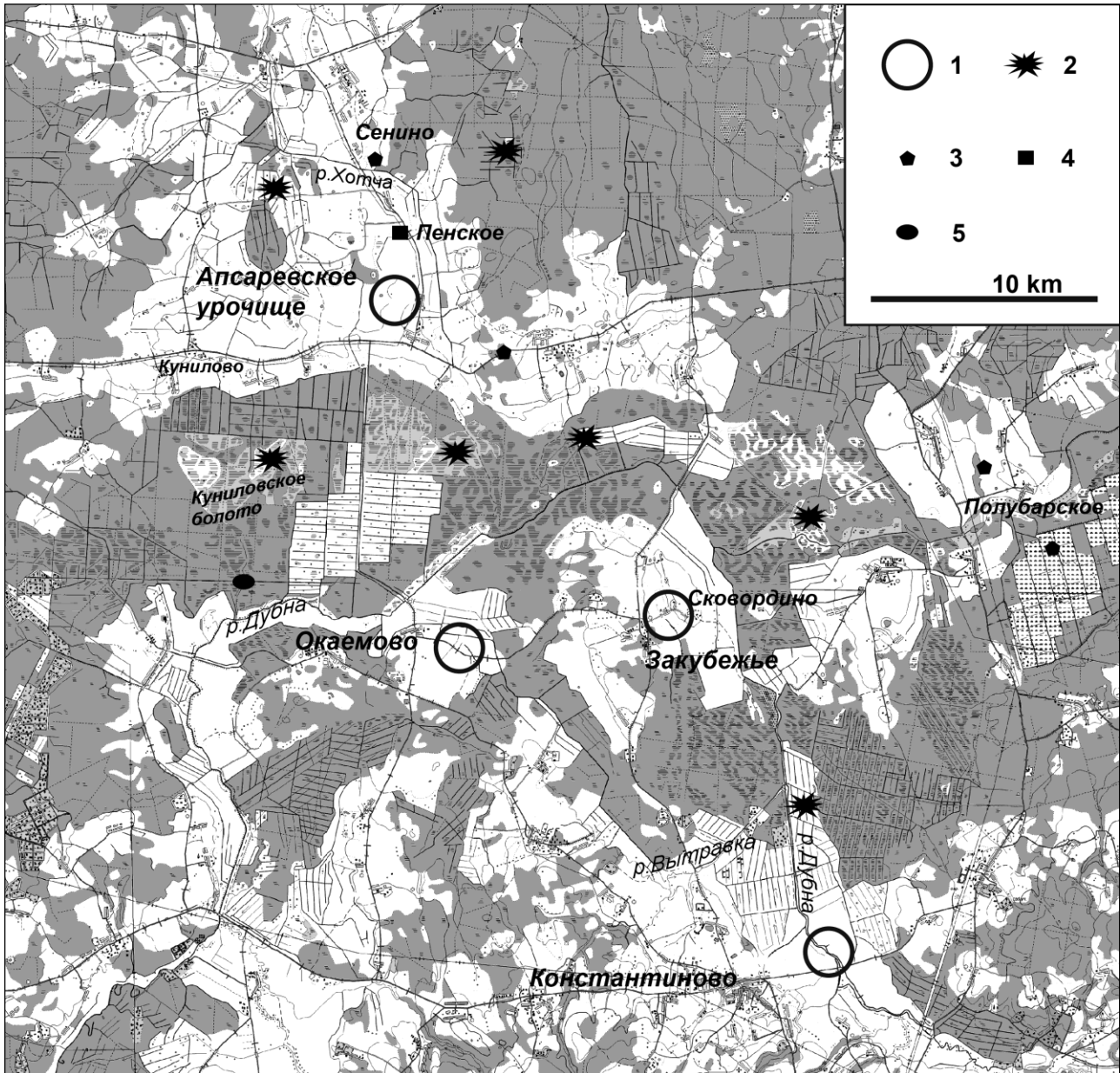
В этой статье представлены результаты трехлетнего дистанционного слежения и визуальных наблюдений за серым журавлем, которого снабдили GPS-GSM передатчиком на территории Дубненского предотлетного скопления в 2018 г. Их анализ позволил уточнить индивидуальные особенности использования журавлем территории упомянутого осеннего скопления, географические связи с другими предотлетными скоплениями и местами миграционных остановок в европейской части России и на Украине, фенологию миграции и размножения, межгодовые различия в использовании миграционных путей и мест зимовок серых журавлей в аридной зоне Восточной Европы, Аравийского полуострова и северо-восточной Африки.

### Материалы и методы

Самец серого журавля, названный Рыжиком, пойман птенцом 27 августа 2018 г. на севере Московской области (56° 38' с.ш.; 37° 53' в.д.) – на территории Дубненского предмиграционного скопления у д. Окаево (рис. 1; Свиридова и др., 2022). Для отлова использовали зерна пшеницы, смешанные с транквилизатором альфа-хлоралозой и рассыпанные на поле в месте кормежки журавлей (Маркин, 2013). Пол птицы определен молекулярно-генетическим методом с использованием маркера EE0.6 (Мудрик и др., 2013). Птенца поместили комбинацией цветных пластиковых колец и GPS-GSM передатчиком (Ильяшенко и др., 2020). Передатчик произведен в университете г. Констанц и предоставлен Институтом поведения животных Макса Планка (Германия), в рамках международного проекта «1000 журавлей». Работа проведена по разрешению государственных природоохранных органов.

Основные данные об использовании пространства журавлем получены путем позиционирования географических координат мест пребывания птицы с помощью GPS-GSM передатчика. В 2018-2019 гг. сигналы передатчика поступали более регулярно – до десяти, иногда более, в день. В 2020-2021 гг. их периодичность постепенно сократилась до 1-2 раз в сутки. Иногда сигналы пропадали, вероятно, из-за недостаточного заряда батареи или нахождения птицы в местах, где отсутствует сотовая связь. В ряде случаев после восстановления работы передатчика удавалось получить ретроспективные координаты пребывания журавля, но некоторые довольно длительные интервалы времени, особенно в летний период (до 17-35 дней), остались не охвачены. Часто сигналы отсутствовали во время наиболее протяженных перелетов птицы в период миграции. Поэтому в большинстве случаев даты отлёта и прилёта журавля определены приблизительно – как интервал дат

или предположительная дата. По этой же причине во многих случаях приблизительно указаны число и продолжительность миграционных остановок, а также продолжительность перелетов (табл. 1, 2). В статье проанализированы данные по 25 февраля 2022 г. включительно – последний день пребывания журавля на зимовке в 2021/2022 гг.



**Рис. 1.** Территория Дубненского предотлетного скопления в Московской области, где помечен передатчиком журавль Рыжик, и места, где он встречался и гнезвился. Условные обозначения: 1 – основные кормовые поля журавлей во время существования скопления, 2 – основные ночевки журавлей во время существования скопления, 3 – места посещения журавлем в апреле и мае 2019 и 2020 гг., 4 – место встречи Рыжика с птенцами в 2021 г., 5 – предполагаемое место расположения гнездового участка в 2021 г.

Сигналы передатчика поступали в онлайн базу данных Movebank, разработанную Институтом поведения животных Макса Планка (Movebank ..., 2022), откуда их скачивали в ГИС формате для дальнейшей обработки. Протяженность миграционных путей определяли как сумму расстояний, измеряя их как прямые линии между местами предотлетных скоплений, миграционных остановок,

районов зимовки или гнездования, без учета перемещений в их пределах. Так как в позиционировании координат имелись пробелы, результаты округляли, имея в виду, что это – минимальное зарегистрированное значение протяженности соответствующего этапа миграции (табл. 1, 2).

**Таблица 1.** Характеристики осенней миграции серого журавля Рыжик.

Характеристики	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
<b>Первый этап миграции до Аскании-Нова</b>				
Место начала миграции	Дубненское скопление, МО**	Сычевское скопление, СМ	Дубненское скопление, МО	Дубненское скопление, МО
Дата начала миграции	5 октября	5 октября	14 октября	7-9 октября
Дистанция*, км	1190	1950	1225	1230
Продолжительность	Менее суток	Около 2 суток	2.5-3 суток	Около 5 суток
Места остановок	Нет	Возможно, краткая остановка в РО	Возможно, 1-2 краткие остановки на ночь в ОР и ЗЖ	Возможно, 2 остановки, одна из них в ЧГ (до 2-4 дней)
Продолжительность пребывания в Аскании-Нова	15 дней	18 дней	19 дней	26-27 дней
<b>Второй этап миграции от Аскании-Нова к месту зимовки</b>				
Дата отлета из Аскании-Нова	21 октября	25-28 октября	5-6 ноября	7 ноября
Дистанция*, км	1500	1510	1540	3875 (1550)
Продолжительность	4-6 дней	5-8 дней	3-4 дня	Не менее 13 дней (включая 2-6 дней до Израиля)
Места остановок	Не менее двух ночевок в Турции: на оз. Туз и севернее г. Эрегли в пров. Конья; возможно, суммарно остановки заняли 4-5 дней	Возможно, была остановка на 1-2 дня в Турции	Возможно, была краткая остановка на юге Турции (МС или АД)	Возможно, была краткая остановка в Турции; остановка в Израиле у г. Афула (не менее 5 дней)
Место зимовки	Долина Хула, Израиль	Долина Хула, Израиль	Долина Хула, Израиль	Поля у оз. Тана, гор. Верэта, Эфиопия
Дата прибытия на зимовку	24-26 октября	29 октября – 1 ноября	8-9 ноября	19-26 ноября
<b>Общая продолжительность миграции</b>				
Количество дней	20-22 дня	25-28 дней	26-27 дней	Не менее 42-44 дней

**Примечание к таблице 1:** \* – дистанция рассчитана как расстояние от последней известной координаты перед отлетом с территории предыдущего пребывания до первой известной координаты в конечном пункте соответствующего этапа миграции; при наличии промежуточных остановок – как сумма расстояний таких отрезков. \*\*Регионы России: МО – Московская область, СМ – Смоленская область, РО – Ростовская область, ОР – Орловская область; регионы Украины: ЗЖ – Запорожская область, ЧГ – Черниговская область; регионы Турции: АД – провинция Адана, МС – провинция Мерсин.

Помимо анализа данных с GPS-GSM передатчика были проведены полевые наблюдения для определения социального статуса птицы (одиночка, пара или семья) и уточнения характеристик используемых ею участков. Большую часть этой работы осуществляли в восточной части Талдомского и на севере Сергиево-Посадского городских округов Московской области в весенне-летний и осенний периоды 2018-2021 гг. Обследовали также места летнего пребывания журавля в Смоленской области в 2019 г. и его зимние местообитания в Израиле в 2019-2021 гг. Дополнительно использованы материалы видеофиксации с фотоловушки, установленной М.Н. Ивановым на одном из болот заказника «Журавлиная родина», и фотоматериалы из гнездовой и зимовочной частей ареала. Для обработки данных использовали программы QGIS 3.10, Google Earth Pro, Microsoft Office Excel.

**Таблица 2.** Характеристики весенней миграции серого журавля Рыжик в 2019–2021 гг. с места зимовки в долине Хула, Израиль.

Характеристики	2019 г.	2020 г.	2021 г.
<b>Первый этап миграции из Израиля в Украину</b>			
Дата начала миграции	5-9 марта	15-16 марта	5-6 марта
Места остановок в Турции	Лагуна Юмурталык в провинции Адана (5-7 дней) и долина р. Кызылырмак в провинции Чорум (6 дней)	У г. Имамоглу в провинции Адана (5-7 дней); возможно, долина р. Кызылырмак в провинции Кайсери (от 1 до 9 дней)	Возможно, остановка в провинции Невшехир (не более суток)
Места остановок на Украине	Аскания-Нова (не менее 22, возможно, до 33-38, дней; с 9 по 19 апреля сигналы отсутствовали)	1) Аскания-Нова (не менее 4 дней); 2) граница Луганской и Харьковской областей (не менее 1 дня, возможно, более и даже до 3 недель)	1) Аскания-Нова (6-7 дней); 2) граница Харьковской и Полтавской областей (11-14 дней); 3) возможно, на севере Сумской области
Дата прибытия на места остановок на Украине	19-24 марта	1) 23 марта – 1 апреля; 2) 5 апреля	1) 8-9 марта; 2) 15-16 марта; 3) единственный сигнал получен 29 марта (возможно, в полете)
Дистанция до Аскании Нова*, км	1485	1475	1465
Общая дистанция**, км	1485	1960	1765
Продолжительность перелета из Израиля на Украину**	11-20 дней	12-21 день	10-12 дней
Продолжительность пребывания на Украине	Не менее 22, возможно, до 38 дней	Точно не ясна: от 5-13 до 25-33 дней	Не менее 18 и не более 25 дней
<b>Второй этап – перемещения в гнездовые районы</b>			
Дата отлета из Украины	27-28 апреля	Неизвестна	28-31 марта
Район первой остановки в пределах гнездового ареала вида в России	Юг Московской области	Неизвестен, возможно, юг Вологодской области (рис. 3)	Юг Брянской области
Дата начала миграции	5-9 марта	15-16 марта	5-6 марта

## Продолжение таблицы 2.

Характеристики	2019 г.	2020 г.	2021 г.
<b>Второй этап – перемещения в гнездовые районы (продолжение)</b>			
Дистанция, км	965	Неизвестна, возможно, 1075 км (до Вологодской области; рис. 3)	850
Продолжительность перелета	1.5-2 суток	Неизвестна	2-4 дня
Дата прилета в гнездовые районы***	28-29 апреля	Неизвестна, возможно 27 апреля (в Вологодскую обл.)	3-5 апреля
Продолжительность перелета с зимовки в гнездовые районы***	54-55 дней	Точно не известна, не менее 21-22 дней	29-32 дня

**Примечания к таблице 2:** \* – до первого после перелета через Черное море места поступления сигнала в пределах этой обширной миграционной остановки; \*\* – продолжительность перелета из Израиля и общая дистанция рассчитаны до последней относительно длительной (в 2020 г. – граница Луганской и Харьковской областей) остановки на Украине; \*\*\* – за даты прилета в гнездовые районы приняты даты первого сигнала, поступившего из гнездового ареала серого журавля в России после того, как птица покинула последнюю миграционную остановку на Украине в 2019-2020 гг., и дата первого сигнала в районе гнездования в заказнике «Журавлиная родина» Московской области в 2021 г.

### Результаты и обсуждение

*Использование журавлем территории Дубненского скопления в первую после мечения осень.* В 2018 г. в ближайшие после мечения сутки Рыжик оставался в окрестностях д. Окаево, а 29 августа переместился примерно на 15 км юго-восточнее и большую часть осени провел в долине р. Дубны и ее притока р. Вытравки у с. Константиново (рис. 1). Во время визуальных наблюдений 12 сентября удалось выяснить, что в состав семьи Рыжика входил еще один птенец (Свиридова и др., 2022).

Сельскохозяйственные выдела вокруг упомянутых населенных пунктов – традиционные места кормежки серых журавлей Дубненского предмиграционного скопления (Гринченко и др., 2015). После отлова и выпуска Рыжика, только в ночь с 28 на 29 августа и дважды незадолго до отлета на юг (1 и 4 октября), семья ночевала на обширном болоте заказника «Журавлиная родина» южнее д. Кунилово (рис. 1).

*Осенняя миграция.* Данные по осенней миграции представлены на рисунке 2 и в таблице 1. В 2018, 2020 и 2021 гг. она начиналась с территории Дубненского предотлетного скопления, а в 2019 г. – из Смоленской области (рис. 2), на северо-востоке которой в Сычевском и Новодугинском районах формируется Сычевское предмиграционное скопление (Маркин, 2013; Кадастр ..., 2007).

Отлет серых журавлей из Северного Подмосковья происходит в период с 15 сентября по 15 октября (Volkov et al., 2016). В течение трех сезонов Рыжик начинал миграцию в первой декаде октября, но в аномально теплую для центра европейской части России осень 2020 г. (Бирман, 2021) он улетел позже (табл. 1), как и большинство журавлей Дубненского предотлетного скопления в тот год (авторские данные). Это согласуется с выявленной ранее тенденцией смещения дат отлета журавлей Дубненского скопления на более поздние сроки в течение последних двух-трех десятилетий, что обусловлено климатическими изменениями в регионе (Volkov et al., 2016; Кузьмина, Трешкин, 2017, 2018; Кузьмина и др., 2022).

Наиболее значимые места миграционных остановок гнездящихся в европейской части России серых журавлей – биосферный заповедник Аскания-Нова и залив Сиваш Азовского моря в Херсонской области Украины (в таблице 1 и далее в тексте – Аскания-Нова), а также бассейн оз. Маньч-Гудило в Ростовской области, Ставропольском крае и Республике Калмыкия в России



(Белик, 2006; Горлов, 2012; Редчук и др., 2015). Во все годы по пути на зимовку Рыжик останавливался в Аскания-Нова. В 2019 г., в отличие от других сезонов, до прибытия в Асканию-Нова он, возможно, посетил с краткой остановкой бассейн оз. Маныч-Гудило в Ростовской области (рис. 2), и его путь был на 720-760 км длиннее (табл. 1).

В бассейне оз. Маныч-Гудило останавливаются журавли, преимущественно гнездящиеся на северо-востоке, востоке и юго-востоке европейской части России и в Западном Казахстане, в меньшей степени – в центре европейской части (Белик, 2006; Ильяшенко и др., 2022а). В 2019 г. сходный с Рыжиком характер осенней миграции зарегистрировали еще у одного серого журавля, летевшего из центра европейской части России, из Рязанской области. Эта птица сделала двухнедельную остановку в долине Маныча и осталась зимовать в Аскании-Нова (Ильяшенко и др., 2022а). Мигрирующие из Финляндии серые журавли используют эту территорию на юге Украины для пополнения энергетических запасов во время продолжительной остановки, тогда как птицы из Эстонии останавливаются там только на ночевку или при ухудшении погодных условий во время перелета (Ojaste et al., 2020). Таким образом, остановка в Аскании-Нова имеет разное функциональное значение для журавлей из различных гнездовых группировок Северной и Восточной Европы.

На пути через Турцию Рыжик останавливался на краткий отдых или ночевку в центре этой страны (рис. 2), где в долинах рек или озер, в том числе соленых (напр., оз. Туз) имеются мелководья для отдыха и обрабатываемые сельскохозяйственные поля для кормежки. Неизвестно, останавливался ли он на северном побережье Средиземного моря в провинции Адана, хотя имеются данные, что часть серых журавлей, мигрирующих из Эстонии и Финляндии через Украину и Турцию (Ojaste et al., 2020), а также из центра европейской части России (Постельных и др., 2022), делают краткие остановки в провинции Адана.

Три первые осенние миграции Рыжик завершал в долине Хула в Израиле (рис. 2). В 2021 г. он только на 5-10 дней останавливался в середине ноября в Израиле, причем не в долине Хула, а на 50-60 км южнее – на сельскохозяйственных полях в районе г. Афула. Там на зимовке отмечали и других меченых в европейской части России журавлей (Постельных и др., 2018; Ильяшенко и др., 2022в). Судя по сигналу, поступившему 17 ноября с северо-востока Египта, в этот день журавль продолжил осеннюю миграцию в направлении мест зимовки в Северо-Восточной Африке. Возможно, уже в ближайшие сутки-двое он достиг окрестностей г. Верэта в Эфиопии, но сигнал оттуда поступил только 26 ноября. Не исключено, что до оз. Тана журавль мог останавливаться на отдых в Судане, где на западном побережье Красного моря и в долине р. Кассала известны места остановок серых журавлей, мигрирующих из Эстонии (Лейто и др., 2014).

Таким образом, осенний перелёт Рыжика на места зимовки, с учетом миграционных остановок, длился в разные годы от 20-28 дней (в Израиль) до 42-50 дней (в Эфиопию) и имел протяженность от 2690 до 3460 и 5105 км, в зависимости от выбранного маршрута.

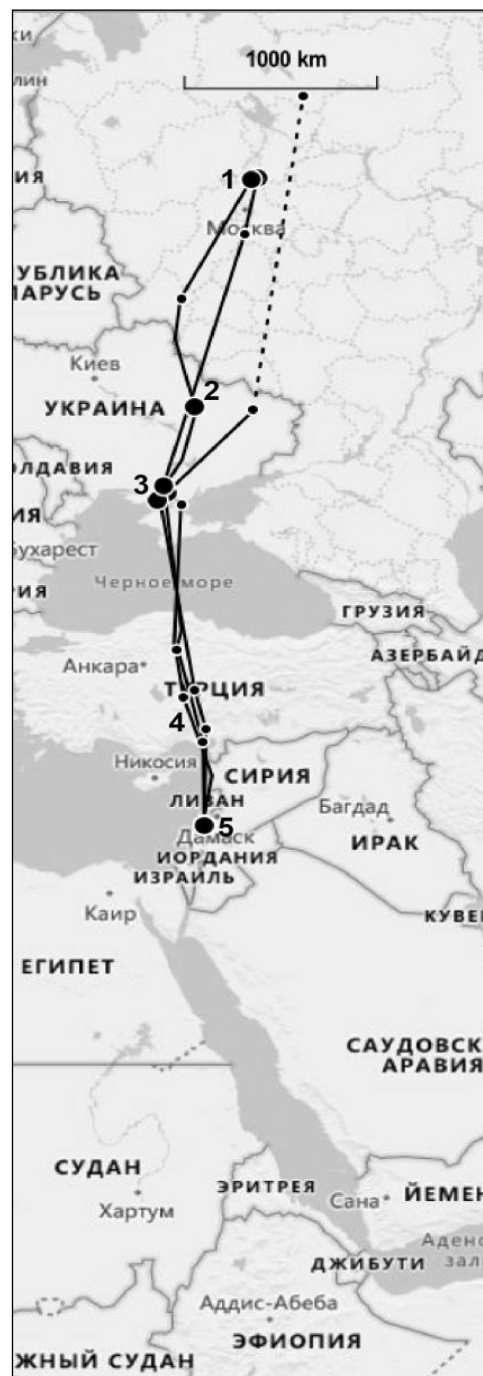
*Весенняя миграция, сроки прилета и гнездование.* Весенняя миграция прослежена только из долины Хула. В 2020 г. она началась позже, чем в 2019 и 2021 гг., но в полной мере её характер в этом сезоне выяснить не удалось – остались неизвестными даты отлета с территории Украины и точный срок прилета в гнездовые районы (рис. 3, табл. 2). В целом, весенний пролетный путь сходен с осенним (рис. 2, 3), но весенние перемещения и места миграционных остановок более разнообразны (табл. 2).

На первом этапе миграции журавль летел из долины Хула в Асканию-Нова с кратковременными остановками в Турции. На пути через Турцию останавливался на ночной отдых на севере и в центре страны, а также в провинции Адана – традиционном месте миграционных остановок серых журавлей (Pekarsky et al., 2018; Prange, Ilyashenko, 2019). Протяженность пути от долины Хула до Аскании Нова весной 2019 г., как и осенью (табл. 1), составила около 1500 км.

Весной 2020 и 2021 гг. общая дистанция первого этапа миграции была немногим больше, так как после непродолжительной остановки в Аскании-Нова журавль переместился на северо-восток Украины: в 2020 г. – на границу Луганской и Харьковской областей, в 2021 г. – на границу Харьковской и Полтавской областей (табл. 2, рис. 3). Далее начинался перелёт в гнездовую часть ареала, обычно – с краткими остановками в разных регионах России до прибытия в район основного по продолжительности места летования или гнездования (Свиридова и др., 2022).



**Рис. 2.** Пути осенней миграции. Условные обозначения: сплошные линии – в 2018, 2020 и 2021 гг., пунктир – в 2019 г., 1 – место мечения и начала миграции журавля в 2018 г. в Московской области (Россия), 2 – место летнего пребывания и начала миграции в Смоленской области в 2019 г. (Россия), 3 – основные миграционные остановки на Украине, 4 – места остановки в Турции, 5 – место зимовки в долине Хула (Израиль), 6 – место зимовки на оз. Тана (Эфиопия).



**Рис. 3.** Пути весенней миграции. Условные обозначения: пунктир – точные данные о пути и местах остановок на этом отрезке миграции в 2020 г. отсутствуют, 1 – места мечения журавля в 2018 г., кратких весенних остановок в 2019 и 2020 гг. и гнездования в 2021 г. в Московской области (Россия), 2 – основная миграционная остановка на северо-востоке Украины в 2021 г., 3 – основная миграционная остановка на юге Украины в 2019 и 2020 гг., 4 – места остановки в Турции, 5 – место зимовки в долине Хула (Израиль).

Перелет из долины Хула до района мечения в «Журавлиной родине», с учетом миграционных остановок, в 2019 г. занял 55–56 дней, а в 2021 г. – не более 32 дней.

В 2019 г. Рыжик лишь на короткое время посетил район мечения в Московской области, где 30 апреля около суток провел на пруду и залитых торфяных карьерах у д. Полубарское (рис. 1). Большую часть весенне-летнего сезона и осень журавль держался на северо-востоке Смоленской области (Свиридова и др., 2022).

В 2020 г. места пребывания Рыжика с 5 апреля, когда он прилетел в Луганскую область Украины, до 27 апреля, когда сигнал поступил из Вологодской области России, неизвестны (табл. 2, рис. 3). После возобновления сигналов журавль посещал весной район мечения на севере Московской области только 11 и 19 мая, в том числе – окрестности д. Сенино (рис. 1), рядом с которой в пойме р. Хотчи в эти же даты ночевала небольшая группа журавлей. Вновь на территорию Дубненского скопления он прилетел в конце июня. Там 16 сентября Рыжика наблюдали в стае журавлей у д. Сковордино (рис. 1). К этому времени он еще не образовал пару (Свиридова и др., 2022).

В 2021 г., после третьей зимовки, Рыжик прилетел в «Журавлиную родину» сразу после окончания миграции (табл. 2). Видеозапись с фотоловушки показала, что 8 апреля, через три дня после прилета, журавль выполнял территориально-брачные демонстрации в южной части Куниловского болота (рис. 1; Свиридова и др., 2022). Обследовать эту территорию в гнездовое время не удалось, но 2 сентября журавля встретили в «Апсаревском урочище» заказника «Журавлиная родина» с самкой и двумя птенцами. Семья кормилась в составе крупной стаи на свежеспаханном поле у д. Пенское (рис. 1), примерно в 11 км от места, где была установлена фотоловушка. Гнездовая территория Рыжика, предположительно, находилась в 150–200 м от места установки фотоловушки – в затопленных черноольшаниках южной части Куниловского болота (рис. 1).

Считалось, что большинство журавлей начинают размножаться в возрасте 4 и более лет (Флинт, 1987), поэтому факт гнездования самца серого журавля в трехгодовалом возрасте интересен. Данные о меченых птенцах журавлей, места гнездования родителей которых были известны, показали, что по достижении половой зрелости они занимают территории в районе места рождения (Наyes, 2015; Кондракова и др., 2021; Ильяшенко и др., 2022б). Перемещения Рыжика в 2018–2021 гг., позволяют предположить, что он пойман в августе 2018 г. в районе места рождения, где и загнезвился в 2021 г. Более ранний прилет в гнездовые районы взрослых размножающихся журавлей, по сравнению с неполовозрелыми особями, обычен у этого вида (Маркин, 2013), именно этим и определяется разница прилета отслеживаемого нами журавля в 2019 и 2021 гг. (табл. 2).

*Места зимовки.* Зиму 2018/2019 гг. и две следующих Рыжик провел в долине Хула (рис. 2, 4). Здесь зимуют журавли, гнездящиеся в западной Финляндии, Прибалтике, европейской части России и Западном Казахстане (Маркин, 2013; Prange, Pyashenko, 2019; Ильяшенко и др., 2022 а, б). Там же встречены три журавля, помеченные цветными кольцами на месте Дубненского предмиграционного скопления в 2017 г. Двух из них, отловленных взрослыми, наблюдали 6 и 20 октября 2017 г. (Гринченко и др., 2018), а помеченного птенцом в 2017 г. – 3 декабря 2021 г. (Ильяшенко и др., 2022в).

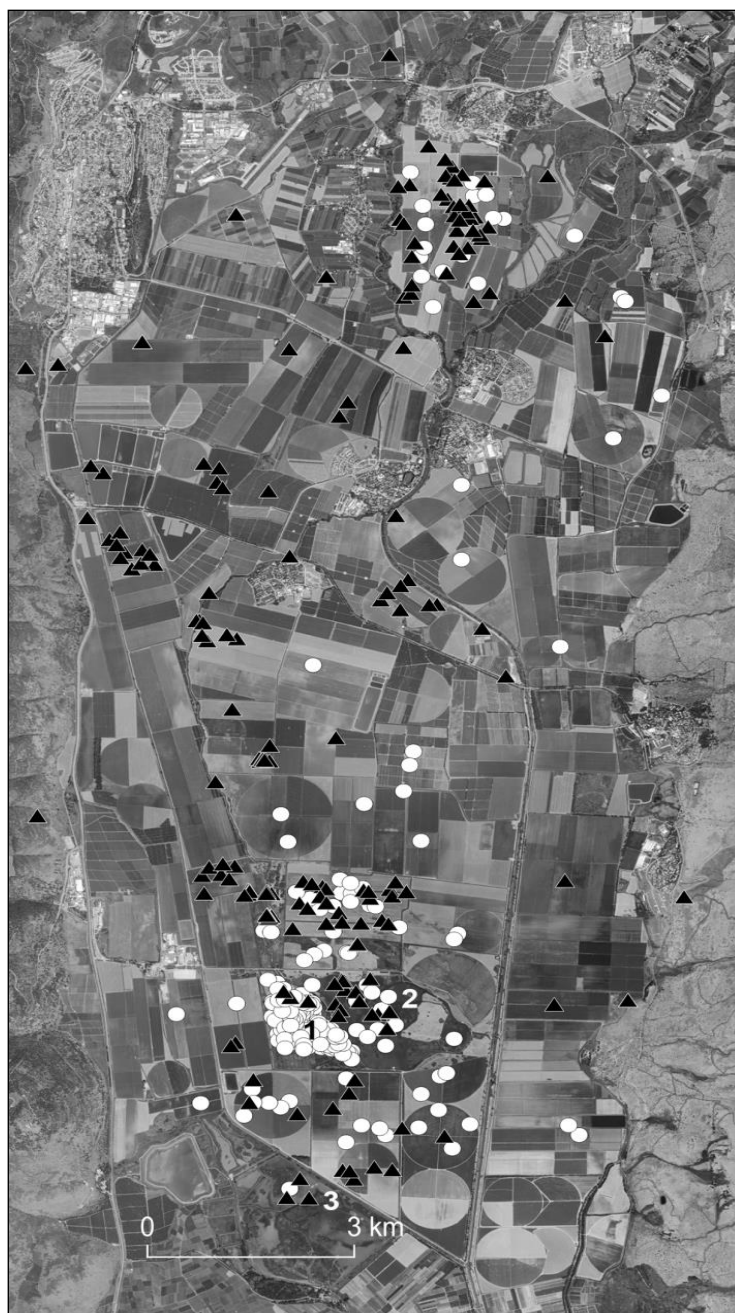
Указанные выше даты встреч меченых журавлей в 2017 г. в долине Хула – более ранние, чем даты прилета на израильскую зимовку Рыжика во все годы (табл. 1). Начало октября 2017 г. во многих регионах европейской части России оказалось аномально холодным (Бирман и др., 2018). Вероятно, по этой причине многие журавли улетели на юг раньше как с места предмиграционного скопления в Московской области России, так и с места миграционной остановки на Украине.

В долине Хула журавли обычно в большом числе держатся в природном парке Агамон Хула, где с декабря, после начала посевной кампании, их подкармливают зернами кукурузы, чтобы отвлечь от фермерских полей (Shanny et al., 2012). Часть птиц кормится в окрестностях парка на убранных полях зерновых и арахиса, посевах люцерны, а также в рощах миндаля и пекановых деревьев. Ночуют журавли преимущественно в парке на мелководном оз. Агамон, реже на водохранилище Эйнан в заповеднике Хула (Pekarsky et al., 2021). В ноябре 2018 г. Рыжик держался на убранных полях на севере долины (рис. 4). С декабря, после начала подкормки, он значительное время проводил на подкормочном поле и в его ближайших окрестностях. Зимой 2019/2020 гг. подкормка началась только в начале февраля (И. Рубин, личн. сообщ.), поэтому журавль более широко перемещался по полям и водоёмам в пределах долины в течение всей зимовки (рис. 4). При этом в

ноябре 2019 г. он чаще посещал южную половину долины, где преобладают рощи миндаля, а в декабре, после начала посевной, кормился в её северной части.

В 2021 г. с конца ноября, или несколько ранее, и по 25 февраля 2022 г. Рыжик держался на равнине Фогера, прилегающей к восточному берегу крупного озера оз. Тана в Эфиопии – традиционном месте зимовки серых журавлей (рис. 2; Nowald et al., 2010). В этой местности имеются мелководные болота, сельскохозяйственные поля и пастбища.

Таким образом, один журавль в течение трех зим использовал две различные территории в аридных регионах Аравийского полуострова и северо-востока Африки. Длительность пребывания на зимовке в Израиле составила не менее 108, возможно, до 115, дней в 2018/2019 гг., 128-132 дня в 2019/2020 гг. и 117-119 дней в 2020/2021 гг. На зимовке в Эфиопии журавль провел 92-98 дней.



**Рис. 4.** Локации Рыжика на зимовке в долине Хула (Израиль). Условные обозначения: белые кружки – зимой 2018/2019 гг., черные треугольники – зимой 2019/2020 гг., 1 – подкормочное поле, 2 – оз. Агамон, 3 – вдхр. Эйнан.

### Выводы

Серый журавль из гнездовой группировки на севере Подмосковья во все годы использовал русско-понтийский пролётный путь, пополняя энергетические запасы во время миграции на остановках в сельскохозяйственных угодьях аридных регионов Украины, России, Турции и Израиля.

Зимовал в двух районах – долине Хула в Израиле и окрестностях оз. Тана в Эфиопии. Протяженность миграционного пути составила от 2690 до 5105 км, в зависимости от расположения места зимовки.

Сельскохозяйственные угодья Израиля служили птице в трех сезонах местом основной зимовки, а во время четвертой осенней миграции – местом остановки для пополнения энергетических запасов между двумя отрезками транзитной миграции. Таким образом, функциональное значение территории, используемой журавлями во время зимовки в аридных регионах, может быть различным в разные годы.

За три года в период формирования предотлетных скоплений, остановок на миграциях и на местах зимовки снабженный передатчиком серый журавль использовал не менее 23 территорий в шести областях России, шести областях Украины, шести провинциях Турции, в одном округе Израиля и одном штате Эфиопии. Таким образом, для разработки мер по долговременному сохранению вида на этой территории необходима координация специалистов из пяти стран.

*Благодарности.* Мы благодарим В.Ю. Ильяшенко (ИПЭЭ РАН) за работу по отлову и мечению журавля, А. Рубановича и А. Севрюгина, волонтеров заказника «Журавлиная Родина», за участие в полевых работах в 2018 г. и Е. Мудрик (Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова) за определение пола журавля, а также С. Пекарски (Институт естественных наук Еврейского университета Иерусалима) и О. Першина, фотолюбителя, за любезно предоставленные фотографии встреч Рыжика. Выражаем признательность сотрудникам Института поведения животных Макса Планка (Германия) В. Фидлеру и Б. Форнвегу и Университета Констанц (Германия) Г. Хейне за предоставление передатчика, а также И.Г. Покровскому за подготовку разрешительных документов. Благодарим Рабочую группу по журавлям Германии (Crane Conservation Germany) за предоставление цветных пластиковых колец ELSA.

*Финансирование.* Работа Т.В. Свиридовой выполнена в рамках темы «Экологические и эволюционные аспекты поведения и коммуникации животных» ИПЭЭ РАН, № госрегистрации АААА-А18-118042690110-1, № госзадания 0089-2021-0004; Е.И. Ильяшенко – в рамках темы «Фундаментальные проблемы охраны живой природы и рационального использования биоресурсов» ИПЭЭ РАН, № госрегистрации АААА-А18-118042490055-7, № госзадания 0089-2021-0010; О.С. Гринченко – в рамках темы «Исследования геоэкологических процессов в гидрологических системах суши, формирования качества поверхностных и подземных вод, проблем управления водными ресурсами и водопользованием в условиях изменений климата и антропогенных воздействий» ИВП РАН (№FMWZ-2022-0002), № госрегистрации 122041100236-4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андрющенко Ю.А., Черничко И.И., Кинда В.В., Попенко В.М., Арсиевич Н.Г., Вацке Х., Гавриленко В.С., Горлов П.И., Гринченко А.Б., Думенко В.П., Кириченко В.Е., Кошелев А.И., Кошелев В.А., Лопушанский Е.А., Олейник Д.С., Подпрядов А.А., Прокопенко С.П., Стадниченко И.С., Сиренко В.А., Товпинец Н.Н., Фишер Т., Черничко Р.Н. 2006. Результаты первого большого учета зимующих птиц в зональных ландшафтах юга Украины // Бранта. Вып. 9. С. 123-149.
- Белик В.П. 2006. Миграции серого журавля на юге России // Журавли Евразии (биология, охрана, разведение). Вып. 2. М.: Россельхозакадемия. С. 118-134.
- Бирман Б.А. 2021. Основные погодно-климатические особенности на Северном полушарии Земли. 2020 год. Аналитический обзор. Росгидромет. 68 с.
- Бирман Б.А., Бережная Т.В., Голубев А.Д. 2018. Основные погодно-климатические особенности на Северном полушарии Земли. 2017 год. Аналитический обзор. Росгидромет. 64 с.
- Гринченко О.С. 2019. Изменения численности и пространственной структуры миграционного скопления серых журавлей (*Grus grus*) на севере Подмосковья // Редкие виды птиц Нечерноземного центра России. Материалы VI совещания «Распространение и экология редких

видов птиц Нечерноземного центра России» (Москва, 16-17 ноября, 2019). М. С. 86-89.

- Гринченко О.С., Волков С.В., Свиридова Т.В. 2015. Изменение гнездовой численности, фенологии миграции и структуры осеннего скопления серого журавля под влиянием погодно-климатических и антропогенных факторов // Журавли Евразии (биология, распространение, разведение). Вып. 5. М.-Н. Цасучей: Белый ветер. С. 212-225.
- Гринченко О.С., Свиридова Т.В., Ильяшенко Е.И. 2018. Пути миграций и места зимовок серых журавлей Дубненского предотлетного скопления // Аридные экосистемы. Т. 24. № 4. С. 66-74. [Grinchenko O.S., Sviridova T.V., Ilyashenko E.I. Southern Migration Route and Wintering Grounds of the Common Crane of Dubna Premigratory Gathering // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 4. P. 286-293.].
- Гринченко О.С., Свиридова Т.В., Конторщикова В.В. 2020. Многолетняя динамика экосистем северного Подмосквья (обоснование создания природного парка Журавлиный край) // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 1. С. 104-137. [Электронный ресурс [http://ecosystemsdynamic.ru/wp-content/uploads/2020/04/All-Number-1-2020-Ecosystems-P-1-194-end\\_оптимиз.pdf](http://ecosystemsdynamic.ru/wp-content/uploads/2020/04/All-Number-1-2020-Ecosystems-P-1-194-end_оптимиз.pdf) (дата обращения 14.10.2022)].
- Горлов П.И. 2012. Серый журавль (*Grus grus*) в Украине: миграции, распространение, гнездовая биология, сезонные скопления. Дисс. к.б.н. Киев. 185 с.
- Зубакин В.А., Волошина О.Н., Олексенко А.И., Панчешникова Е.И. 1982. Серый журавль в Московской области и проблемы его охраны // Журавли в СССР. Л. С. 75-83.
- Ильяшенко Е.И., Ильяшенко В.Ю., Викельски М., Цао Л. 2022а. Предварительные результаты слежения за мечеными серыми журавлями в европейской части России и Западной Сибири в 2019-2021 гг. // Информационный бюллетень Рабочей группы по журавлям Евразии. № 16. С. 157-169.
- Ильяшенко Е.И., Ильяшенко В.Ю., Белик В.П., Кондракова К.Д., Андрющенко Ю.А. 2022б. Мечение красавки в европейской части ареала в 2020 и 2021 гг. // Информационный бюллетень Рабочей группы по Журавлям Евразии. № 16. С. 191-204.
- Ильяшенко Е.И., Ильяшенко В.Ю., Корепов М.В., Свиридова Т.В., Гринченко О.С., Маркин Ю.М., Покровский И.Г., Фидлер В., Форнвег Б., Хейне Г., Викельски М. 2020. Предварительные результаты мечения серых журавлей в пределах гнездовой части ареала в 2018 и 2019 гг. // Информационный бюллетень Рабочей группы по Журавлям Евразии. № 15. С. 143-154.
- Ильяшенко Е.И., Маркин Ю.М., Худякова Е.А., Пекарски С. 2022в. Визуальные встречи серых журавлей, помеченных в европейской части России, на местах зимовки в долине Хула, Израиль. // Информационный бюллетень Рабочей группы по журавлям Евразии. № 16. С. 181-185.
- Ильяшенко Е.И., Мудрик Е.А., Андрющенко Ю.А., Белик В.П., Белялов О.В., Викельски М., Гаврилов А.Э., Горошко О.А., Гузуева Е.В., Корепов М.В., Мнацеканов Р.А., Политов Д.В., Постельных К.А., Цао Лей, Ильяшенко В.Ю. 2021. Миграции красавки (*Anthropoides virgo*, Gruiformes): дистанционное слежение на путях пролета и зимовках // Зоологический журнал. Т. 100. № 9. С. 1028-1054.
- Кадастр мест скоплений серых журавлей Российской Федерации. 2007. Неопубликованная база данных Рабочей группы по Журавлям Евразии. Место нахождения Базы: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН. Россия, 119071, Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: eilyashenko@savingcranes.org.
- Кондракова К.Д., Маркин Ю.М., Постельных К.А., Ильяшенко В.Ю., Пекарски С., Натан Р., Ильяшенко Е.И. 2021. Перемещения непополовозрелых серых журавлей в центре европейской части России // Орнитология. № 45. С. 75-80.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2017. Многолетние изменения основных метеорологических характеристик в зоне южной тайги Европейской части России (бассейн верхней Волги) // Использование и охрана природных ресурсов в России. № 4 (152). С. 50-61.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2018. Многолетние изменения влажностно-температурного режима в зоне южной тайги европейской части России (бассейн верхней Волги) // Использование и охрана природных ресурсов в России. №2 (154) С. 55-63.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е., Черноуцкий С.В. 2022. Методические подходы к выявлению влияния гидротехнических сооружений и климатических изменений на динамику наземных экосистем // Использование и охрана природных ресурсов в России. № 2 (170). С. 3-12.
- Лейто А., Селлис У., Луйгуйё Л., Сепп К., Йост И. 2014. Миграции и зимовка серого журавля «Ахья 4» в Эфиопии. // Информационный бюллетень Рабочей группы по Журавлям Евразии. № 13. С. 55-59.
- Лохман Ю.В., Солоха А.В. 2018. Первая зимняя встреча серого журавля в Краснодарском крае // Информационный бюллетень Рабочей группы по журавлям Евразии. № 14. С. 44-45.
- Маловичко Л.В. 2018. Зимовка серого журавля в Ставропольском крае в 2017/2018 гг. // Информационный бюллетень Рабочей группы по журавлям Евразии. № 14. С. 41-43.
- Маркин Ю.М. 2013. Серый журавль в европейской части России // Труды Окского государственного

- природного биосферного заповедника. Рязань: Голос губернии. Вып. 29. 118 с.
- Мудрик Е.А., Каиенцева Т.А., Гамбург Е.А., Политов Д.В. 2013. Определение пола у десяти видов журавлей с помощью ДНК-маркера EE0.6 // Генетика. Т. 49. № 12. С. 1254-1257
- Постельных К.А., Маркин Ю.М., Пекарски С., Натан Р. 2018. Случай нестандартного поведения птенца серого журавля // Информационный бюллетень Рабочей группы по журавлям Евразии. № 14. С. 139-142.
- Постельных К.А., Кондракова К.Д., Маркин Ю.М., Пекарски С., Натан Р. 2022. Мечение серых журавлей в Рязанской области, Россия, в 2020 и 2021 гг. // Информационный бюллетень Рабочей группы по журавлям Евразии. № 16. С. 151-157.
- Редчук П.С., Фээнко Г.В., Слюсарь Н.В. 2015. Миграционные пути серого журавля в Украине // Журавли Евразии (биология, распространение, разведение). Вып. 5. М.-Н. Цасучей: Белый ветер. С. 313-334.
- Свиридова Т.В., Гринченко О.С., Викельски М., Ахатов Е.Е., Иванов М.Н., Хотин Д.В., Ильяшенко Е.И. 2022. Результаты трёхлетнего слежения за серым журавлём, помеченным птенцом на севере Московской области, Россия // Информационный бюллетень Рабочей группы по Журавлям Евразии. № 16. М. С. 169-177. (на русск. и англ.)
- Флинт В.Е. 1987. Серый журавль // Птицы СССР. Курообразные, журавлеобразные. Л.: Наука. С. 266-279.
- Hayes M.A. 2015. Dispersal and population genetic structure in two flyways of Sandhill Cranes (*Grus canadensis*). PhD dissertation. The University of Wisconsin-Madison. 299 p.
- Ilyashenko E., Markin Yu. 2012. Changes in the Eurasian Crane (*Grus grus*) staging areas distribution in the European part of Russia from 1982 to 2007 // Proceedings of the International Workshop "Cranes, Agriculture, and Climate Change". International Crane Foundation, Baraboo, Wisconsin, USA. P. 88-99.
- Kays R., Crofoot M.C., Jetz W., Wikelski M. 2015. Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet // Science. Vol. 348 (6240). P. 1095-9203.
- Movebank for animal tracking data. 2022 [Электронный ресурс [www.movebank.org](http://www.movebank.org) (дата обращения 14.10.2022)].
- Nowald G., Schröder W., Günther V., Aynalem S. 2010. Common Cranes *Grus grus* in Ethiopia // Vogelwelt. Vol. 131. P. 169-174.
- Ojaste I., Leito A., Suorsa P., Hendeström A., Sepp K., Leivits M., Sellis U., Väli Ü. 2020. From northern Europe to Ethiopia: long-distance migration of Common Cranes // Ornis Fennica. Vol. 97. P. 12-25.
- Pekarsky S., Nathan R., Postelnykh K., Markin Yu. 2018. Eurasian crane movement patterns during fall and spring migration journeys along the East-European route // Proceedings of IX European Crane Conference. France, Arjuzanx. P. 47.
- Pekarsky S., Schiffner I., Markin Yu., Nathan R. 2021. Using movement ecology to evaluate the effectiveness of multiple human-wildlife conflict management practices // Biological Conservation. Vol. 262. P. 109306.
- Prange H., Ilyashenko E.I. 2019. Eurasian Crane // Crane Conservation Strategy / Eds. C.M. Mirande, J.T. Harris. Baraboo, Wisconsin, USA: International Crane Foundation. P. 397-423.
- Smirnova E.V., Aksenova A.B., Sviridova T.V., Konovalova T.V., Grinchenko O.S., Zubakin V.A. 1999. The staging area of the Common Crane in the light of landscape and land use history in the Moscow region // Proceedings of the 3rd European Crane Workshop 1996 and actual papers. Halle-Wittenberg. P. 169-171
- Volkov S.V., Grinchenko O.S., Sviridova T.V. 2016. The effects of weather and climate changes on the timing of autumn migration of the common crane (*Grus grus*) in the north of Moscow Region // Biology Bulletin Vol. 43. Iss. 9. P. 1203-1211.

**ПОЕДАЕМОСТЬ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ  
КАК ОДИН ИЗ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПАСТБИЩ МОНГОЛИИ**

© 2023 г. **Е.В. Данжалова\***, **Э. Ариунболд\*\***, **Н.И. Дорофеев\***,  
**Д. Мягмарсүрэн\*\*\***, **С.Н. Бажа\***

*\*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН  
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: tonexp@mail.ru*

*\*\*Институт географии и геоэкологии Академии наук Монголии  
Монголия, 15170, г. Улан-Батор, ул. Баруун, д. 15. E-mail: er\_ariunbold@mail.ru*

*\*\*\*Гуманитарный университет  
Монголия, 14200, г. Улан-Батор, пл. Сухэ-Батора, д. 20, E-mail: dmiigaa@humanities.mn*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

Изучение состояния и хозяйственной ценности пастбищных экосистем Монголии в условиях их прогрессирующей деградации продолжает оставаться весьма актуальными. Существующие методы кормовой оценки пастбищ либо трудоемки (зоотехнический метод), либо не отражают реальной ситуации (оценка общей продуктивности) при формировании малопродуктивных или монодоминантных деградированных сообществ. Для определения кормовой ценности и продуктивности пастбищных экосистем Монголии предложен коэффициент поедаемости (КП), определяемый на основе данных о пищевой привлекательности видов растений, слагающих сообщество, а также разнообразии поедаемых видов. КП рассчитывался отношением поедаемой фитомассы к общей надземной фитомассе, умноженным на число поедаемых видов, входящих в состав доминантов и содоминантов. КП был определен для 158 сообществ луговых и степных пастбищных экосистем. Проведено их ранжирование по 4 категориям. Установлено, что значительная часть исследованных сообществ имеет высокий КП. Хотя эти сообщества характеризуются разной степенью антропогенной нарушенности, в том числе сильной, высокий КП обусловлен тем, что часть дигрессивно-активных видов имеет удовлетворительную или хорошую поедаемость. Вероятно, этим фактом и поддерживается потенциал к увеличению численности скота в Монголии, имеющего широкий диапазон пищевой предпочтительности. В то же время отмечена высокая доля пастбищ с низким и очень низким КП. В большей степени такие пастбища сформированы сообществами настоящих и сухих степей, испытывающих наибольшую пастбищную нагрузку в Монголии.

*Ключевые слова:* Монголия, луговые экосистемы, степные экосистемы, кочевое животноводство, пастбище, пастбищная дигрессия, кормовая оценка, надземная фитомасса, пищевая привлекательность растений, коэффициент поедаемости.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-98-108**

**EDN: RXJSPZ**

Кочевое животноводство в Монголии даже в XXI в. продолжает оставаться одной из важнейших отраслей экономики страны, обеспечивающей постоянно растущие потребности в продуктах животноводства и являющейся основным источником дохода для 20% домохозяйств страны (Грайворонский, 2018). О значимости отрасли говорит рост численности поголовья скота после перехода Монголии к рыночной экономике в 1990 г.: с 25.8 млн. голов в 1990 г. до 67.1 млн. голов в 2020 г. (Mongolian ..., 2020).

В условиях аридности климата, неравномерности выпадения осадков, их резкого колебания по сезонам и годам быстрый прирост общего поголовья скота в Монголии привел к прогрессирующему развитию пастбищной дигрессии, охватывающей все большие площади (Бажа и др., 2020). Согласно разным оценкам, поголовье скота в Монголии превысило кормовую емкость пастбищ уже к середине-концу 1990-х гг. (Muller, Bold, 1996; Гунин и др., 2003; Fujita, Ariunbold, 2014). Пастбищная



дигрессия характеризуется сменой доминантного состава вплоть до формирования трансформированных маловидовых и монодоминантных сообществ, состоящих из дигрессивно-активных видов (*Allium polyrhizum*<sup>1</sup>, *Artemisia anethifolia*, *A. adamsii*, *A. frigida*, *A. laciniata*, *Carex duriuscula*, *Chenopodium acuminatum*, *Ephedra sinica*, *Peganum nigellastrum*, *Sibbaldianthe bifurca*, *Thermopsis lanceolata*, *Iris lactea* и др.; Бажа и др., 2008, 2015; Гунин и др., 2009, 2012; Тувшинтогтох, 2014; Казанцева и др., 2015; Уртнасан, Любарский, 2015; Сафронова, Нарантуяа, 2016). В связи с этим исследования хозяйственной ценности пастбищных экосистем в условиях их современного состояния продолжают оставаться актуальными.

Изучению кормовых особенностей пастбищ Монголии и сопредельных территорий посвящен значительный ряд работ, включающий изучение кормовых характеристик пастбищных растений, их химического состава, продуктивности, кормового запаса и переваримости пастбищных кормов с применением ботанических и зоотехнических методов (Цаценкин, Юнатов, 1951; Юнатов, 1954; Содном, 1968; Бойков и др., 2022; Степи ..., 2002). Из них, как считает А.В. Калинина (1974), только зоотехнический метод, более сложный и трудоемкий по сравнению с другими, может дать достоверную информацию о поедаемом запасе кормов на пастбище, оценку их поедаемости и продуктивности.

С развитием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) стало возможным определять продуктивность (общий запас надземной фитомассы) пастбищ, прогнозировать ее реакцию на климатические колебания, экстраполировать данные на удаленные и труднодоступные территории Монголии (Bat-Oyun et al., 2010; Angerer, 2012; Nanzad et al., 2021). Однако рядом исследователей была выявлена ограниченность использования вегетационных индексов в условиях Монголии (Karnieli et al., 2013; Гунин и др., 2019). Кроме того, общая продуктивность (общий запас надземной фитомассы) в условиях прогрессирующей пастбищной дигрессии, характеризующейся сменой доминантного состава растительных сообществ, не отражает реальной ситуации. Например, на карте текущих общих запасов кормов на сентябрь 2007 г. проекта «Gobi Forage» в сомоне Эрдэнэдалай Среднегобийского аймака запасы кормов составили 100-400 кг/га (Angerer, 2012). По нашим данным, на территории этого сомона в июле 2009 г. общие запасы надземной фитомассы варьировали в пределах 41-376 кг/га, однако в большинстве исследованных сообществ коренные злаки сухих степей (ковыль, житняк, тонконог) были угнетены, а около 80% надземной фитомассы было сформировано ядовитыми для скота видами *Ephedra sinica* и *Peganum nigellastrum* (Гунин и др., 2009). В связи с этим необходима кормовая оценка продуктивности пастбищных экосистем Монголии для установления их хозяйственной ценности и пригодности для выпаса скота.

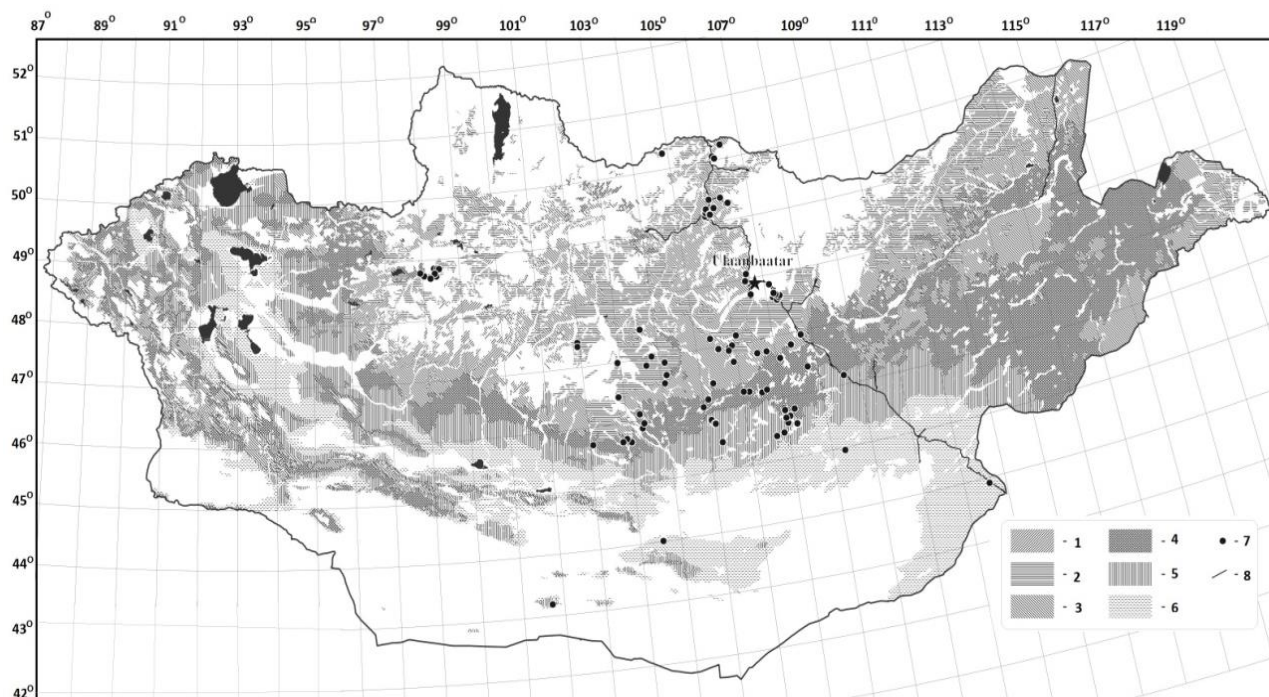
### Материалы и методы

Впервые кормовая оценка на основании расчетных коэффициентов урожайности и поедаемости была проведена для растительных сообществ Окской поймы (Куркин и др., 1998). Другой метод оценки продуктивности пастбищ с учетом продуктивности поедаемых видов и коэффициента допустимого использования пастбища был предложен А.А. Зотовым с соавторами (2009). Учитывая, что методы оценки кормовых особенностей пастбищ для разных регионов не могут быть универсальными в силу различий экологических условий, видов скота и способов его выпаса для оценки продуктивности пастбищных экосистем Монголии нами был предложен коэффициент поедаемости (КП).

При расчете КП использованы данные надземной фитомассы, сбор которой производился в период максимальной вегетации растений (середина июля – конец августа) 2001-2019 гг. в наиболее типичных и широко распространенных растительных сообществах лугов (горные и пойменные) и степей (горно-луговые, луговые, настоящие, сухие, опустыненные и пустынные) с разной степенью пастбищной дигрессии (рис. 1). Часть обследованных сообществ расположены в зоне отчуждения Монгольской железной дороги – УБЖД, пересекающей страну с севера на юг. Эти сообщества были изъяты из традиционного хозяйственного использования с 1955 г. В непосредственной близости в похожих эколого-ландшафтных условиях исследованы сообщества, сформировавшиеся в результате пастбищного использования. Остальные сообщества находились в режиме круглогодичного выпаса.

<sup>1</sup> Латинские названия растений приведены по веб-сайту The Plant List (2022).

Надземную фитомассу срезали по видам у поверхности почвы с 1 м<sup>2</sup> в 3-6 повторностях в зависимости от проективного покрытия и мозаичности сообщества. Фитомассу сушили при температуре 105°C до абсолютно сухого веса, затем взвешивали с точностью до 0.1 г. Виды растений делились на две группы: поедаемые (хорошо и удовлетворительно) и непоедаемые (плохо поедаемые, непоедаемые и ядовитые).



**Рис. 1.** Схема расположения изученных растительных сообществ на карте степных экосистем Монголии. Условные обозначения: 1 – экосистемы криофитноразнотравно-дерновиннозлаковых (высокогорных) степей, 2 – экосистемы умеренно-влажных (злаково-разнотравных луговых) степей, 3 – экосистемы умеренно-сухих (разнотравно-дерновиннозлаковых настоящих) степей, 4 – экосистемы сухих (дерновиннозлаковых) степей, 5 – экосистемы очень сухих (полукустарничково-дерновиннозлаковых опустыненных) степей, 6 – экосистемы пустынных (полукустарничково-дерновиннозлаковых и дерновиннолуговых) степей, 7 – точки расположения растительных сообществ, 8 – УБЖД).

При расчете КП пастбищ мы руководствовались поедаемостью видов растений, а не их питательностью, так как виды, обладающие хорошей поедаемостью, как правило, являются и высокопитательными, в то время как высокопитательные растения могут быть несъедобными (Куркин и др., 1998). Поедаемость пастбищных растений определяли по опубликованным данным (Юнатов, 1954; Damiran, 2005; Jigjidsuren, Johnson, 2008), в которых указана степень их привлекательности для разных видов скота в зависимости от сезона. Однако для упрощения расчетов учитывали поедаемость растений козами и овцами, так как эти виды скота составляют подавляющую часть всего поголовья страны и не имеют привязки к определенным природным зонам.

Качество пастбищ определяется также и видовым разнообразием поедаемых видов, которое обеспечивает более длительное пребывание стада на данном пастбище, а также позволяет использовать это же пастбище в другое время года (Бойков и др., 2002; Jamsranjav et al., 2019). Следует отметить, что доминирование одного вида растений в сообществе может привести к ухудшению кормовых достоинств пастбища, а иногда и к непригодности его для выпаса. Например, луковые монодоминантные сообщества Среднегобийского аймака Монголии, сформировавшиеся в результате интенсивного пастбищного использования на месте дерновиннозлаковых сухих степей. Хотя лук многокорешковый (*Allium polyrhizum*) – доминант этих сообществ, считается хорошо поедаемым видом, однако практика показала, что растение является

съедобным только в смеси с другими поедаемыми видами. Местные скотоводы отмечали частые случаи отравления скота на луковых пастбищах (Бажа и др., 2015). Тем не менее, при расчетах КП *Allium polyrhizum* мы относили к поедаемым видам.

КП рассчитывался отношением поедаемой фитомассы (ПФ) к общей надземной фитомассе (ОНФ), умноженным на число поедаемых видов, входящих в состав доминантов и содоминантов, формирующих в структуре общей надземной фитомассы 8% и более. Далее в тексте для упрощения такие виды будут называться доминантами. Значения КП были ранжированы по 4 категориям: очень низкий (до 0.4), низкий (0.5-0.8), средний (0.9-1.4) и высокий (от 1.5 и выше). КП был рассчитан для 158 сообществ, расположенных в разных типах степей. Предложенный нами КП характеризует потенциал пастбищного сообщества, или использование максимального количества поедаемой массы (100%), а не допустимое, которое может меняться в зависимости от типа сообщества и сезона.

### Результаты и обсуждение

В исследованных осоково-разнотравных сообществах *горных лугов*, расположенных в юго-западных отрогах Хэнтэйского нагорья, КП характеризуется очень низкими (0.4) и низкими (0.8) значениями из-за доминирования и высокого разнообразия видов разнотравья, большая часть которого в условиях пастбищного использования не поедаема (*Thalictrum minus*, *Geranium pratense*, *Sanguisorba officinalis* и др.). Однако в сухом виде (в составе сена) они являются хорошо поедаемым и питательным кормом. Следовательно, такие угодья рекомендуется использовать в качестве сенокосов.

*Пойменные луга* представлены парами сообществ: в режиме длительного отчуждения (злаково-разнотравное, разнотравно-злаковое, злаково-вострецовое) и при пастбищном использовании (осоково-полынное, полынно-вострецово-ирисовое). Во всех сообществах в режиме отчуждения КП высокий (1.6-2.5). При пастбищном использовании (за счет снижения роли поедаемых видов по сравнению с загороженными участками) КП снижался до средних (0.9), а при значительных нагрузках – низких (0.8) и очень низких (0.2) значений при доминировании непоедаемых *Artemisia laciniata* и *Iris lactea*.

Среди обследованных растительных сообществ *горно-луговых степей* низкий (0.7) КП был выявлен в разнотравно-ковыльно-сибирскокузнецовом сообществе с доминированием непоедаемой *Stipa sibirica*. В остальных сообществах КП был высокий (1.6-3.8) вне зависимости от режима использования. При этом в ценозах в условиях отчуждения доминируют *Agropyron cristatum*, *Festuca sibirica*, *Koeleria pyramidata*, *Stipa grandis*, *S. baicalensis*, *Carex pediformis*, *Bassia prostrata*, *Allium bidentatum* и др. В сообществах при выпасе высокий КП поддержан видами, которые разрастаются при пастбищных нагрузках, но в то же время являются хорошо поедаемыми (*Artemisia frigida*, *Caragana pygmaea*, *Carex korshinskyi*, *C. duriuscula*). Кроме того, в пастбищных сообществах, где за счет дигрессивно-активных видов увеличивается разнообразие поедаемых видов, КП выше, чем в аналогичных при отчуждении.

В *луговых степях* очень низкие (0.2-0.4) значения КП получены на пастбищах со злаково-осоково-разнотравным, разнотравно-злаково-осоковым с курильским чаем, злаково-разнотравным сообществами; низкие (0.5-0.8) – в полынно-мятликовом, разнотравно-злаково-полынном, разнотравно-злаково-осоковым, злаково-разнотравно-осоковым, разнотравно-злаковым сообществах с доминированием непоедаемых видов: *Artemisia laciniata*, *A. dracunculus*, *Dasiphora fruticosa*, *Filifolium sibiricum*, *Galium verum*, *Phlomis tuberosa*, *Potentilla acaulis*, *P. tanacetifolia*, *Sanguisorba officinalis*, *Scabiosa comosa*, *Stipa sibirica*, *Thalictrum minus*, *Veronica spicata* subsp. *incana*. Среднее значение (1.3) КП отмечено в крыловоковыльно-осоково-разнотравном сообществе, где в состав доминантов вошли как поедаемые *Koeleria pyramidata*, *Stipa krylovii* и *Carex pediformis*, так и непоедаемые *Potentilla acaulis* и *Thymus mongolicus*. Также, средний (1.0) КП был выявлен в байкальскоковыльном сообществе, находящемся в режиме длительного отчуждения, где *Stipa baicalensis* формировала 96% всей надземной фитомассы. В это же время на пастбище в аналогичных ландшафтных условиях КП был высоким (2.7) за счет увеличения разнообразия поедаемых видов (*Carex duriuscula*, *Cleistogenes squarrosa*, *Stipa baicalensis*). В целом, высокие значения (1.6-3.0) КП отмечены в сообществах, где поедаемые виды составляли более половины от ОНФ, а в составе доминантов находилось не менее трех хорошо поедаемых видов, таких как

*Stipa splendens*, *Cleistogenes squarrosa*, *Leymus chinensis*, *Stipa krylovii*, *Carex duriuscula*, *C. korshinskyi*, *C. pediformis*, *Lespedeza juncea*, *Pulsatilla turczaninowii*, *Vicia cracca*.

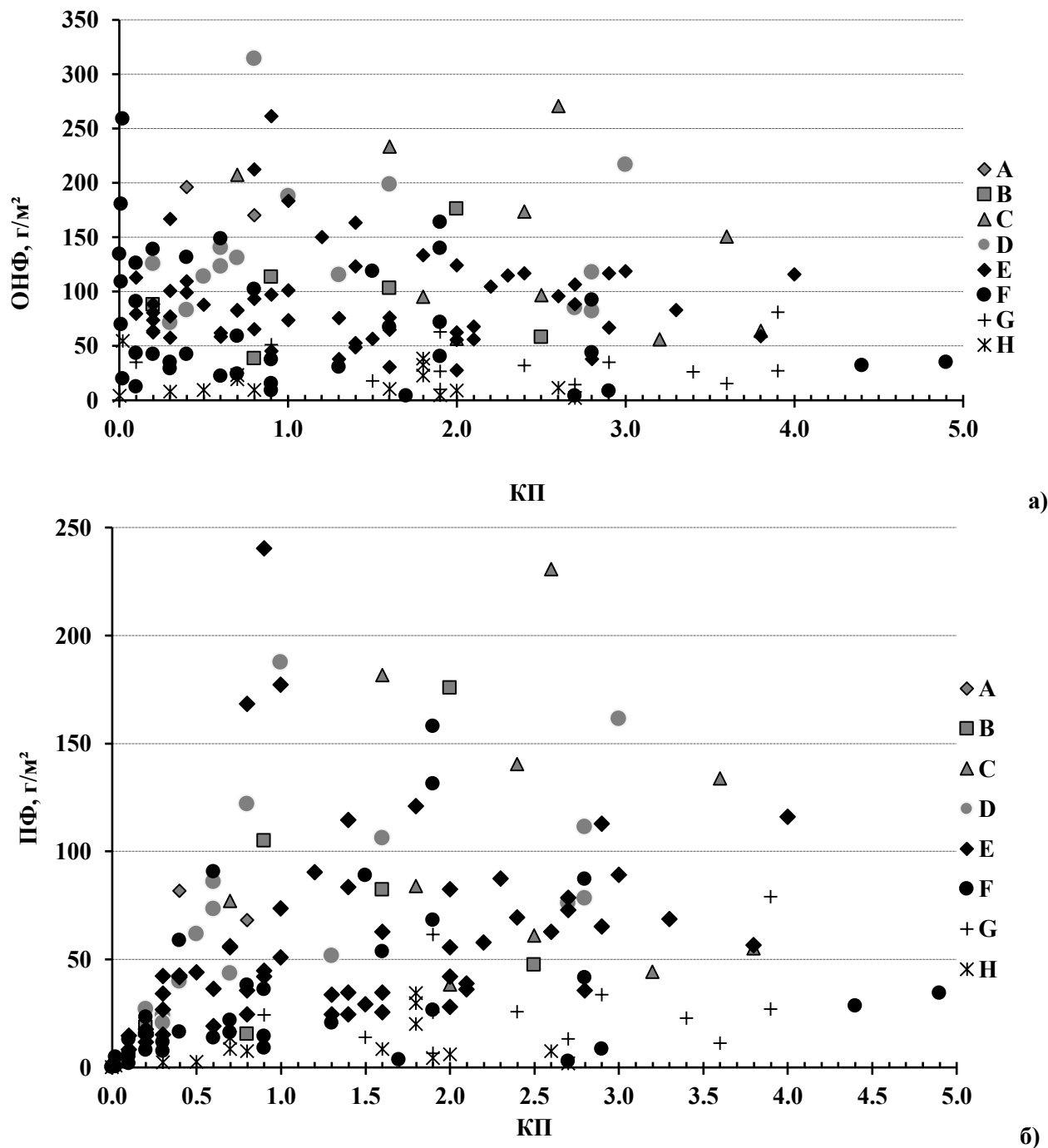
В ценозах *настоящих степей*, находящихся в зоне длительного отчуждения вдоль железной дороги, при единственном поедаемом доминанте (*Stipa baicalensis* или *S. krylovii*) КП был низким (0.8) в разнотравно-байкальскоковыльном сообществе, когда доля этого доминанта в ОНФ составляла 79%, и средним (0.9-1.0) – в байкальскоковыльном и разнотравно-крыловоковыльном сообществах – при 90-99% ОНФ. Высокий (2.7) КП среди огороженных участков отмечен только в разнотравно-востречно-ковыльном сообществе с доминированием *Cleistogenes kitagawae*, *Leymus chinensis*, *Stipa krylovii*. При пастбищном использовании КП повышался (2.2-4.0), по сравнению с огороженными сообществами. Также, как в экосистемах луговых и горно-луговых степей, это происходило за счет возросшего обилия и разнообразия поедаемых дигрессивно-активных видов (*Carex duriuscula*, *Artemisia frigida*). Средние (0.9-1.4) и высокие (1.5-3.8) значения КП на пастбищах обеспечивались, помимо выше перечисленных поедаемых видов, доминированием *Agropyron cristatum*, *Koeleria pyramidata*, *Festuca lenensis*, *Poa attenuata*, *Carex pediformis*, *Agrostis vinealis* и др. Очень низкий (0.1-0.4) и низкий (0.5-0.8) КП был получен при разрастании на пастбищах *Artemisia adamsii*, *A. laciniata*, *Potentilla acaulis*, *P. tanacetifolia*, *Cannabis sativa*, *Veronica spicata* subsp. *incana*, *Dasiphora fruticosa*, *Stipa sibirica*, *Galium verum* и др.

В *сухих степях* очень низкие (0.0-0.4) и низкие (0.6-0.8) значения КП характерны для сильно деградированных эфедровых (*Ephedra sinica*) сообществ, сформировавшихся в сомонах Баян-Унджул и Баян-Цаган Центрального аймака и для сомонов Цаган-Дэлгэр, Гоби-Угтал и Эрдэнэдалай Среднегобийского аймака, а также для сообществ с доминированием *Peganum nigellastrum*, *Thymus serpyllum*, *Astragalus* sp. Кроме того, в годы с хорошим развитием синузидных однолетних видов (*Dysphania aristata*, *Chenopodium acuminatum*, *Salsola collina*) кормовая ценность пастбищ значительно снижается. Низкое значение (0.7) КП было получено для чабрецово-крыловоковыльного сообщества, в котором доля единственного поедаемого вида не превышала 60% в ОНФ. Средние значения (0.9) КП отмечались в монодоминантных луговых сообществах с доминированием *Allium polyrhizum*. Высоким (1.5-4.9) КП обладают сообщества со значительным участием и разнообразием поедаемых видов, таких как *Agropyron cristatum*, *Stipa grandis*, *S. krylovii*, *Leymus chinensis*, *Carex duriuscula*, *Caragana microphylla*, *Bassia prostrata*, *Artemisia frigida* и др.

В *опустыненных и пустынных степях* КП значительно снижается (0.0-0.7) за счет доминирования *Anabasis brevifolia*, *Ephedra sinica* и однолетних *Neopallasia pectinata*, *Dysphania aristata*. Пастбища из *Anabasis brevifolia* пригодны только для верблюдов в осеннее-зимнее время. Низкий (0.7-0.8) КП выявлен для луговых сообществ, где *Allium polyrhizum* был единственным поедаемым среди доминантов и формировал в структуре фитомассы 64-77%. Хорошими (КП = 1.5-3.9) кормовыми достоинствами обладают сообщества с доминированием 2-5 поедаемых видов, какими являются *Stipa tianschanica*, *S. caucasica*, *Cleistogenes songorica*, *Eragrostis minor*, *Allium mongolicum*, *A. polyrhizum*, *Artemisia frigida*, *Bassia prostrata*, *Krascheninnikovia ceratoides* и др.

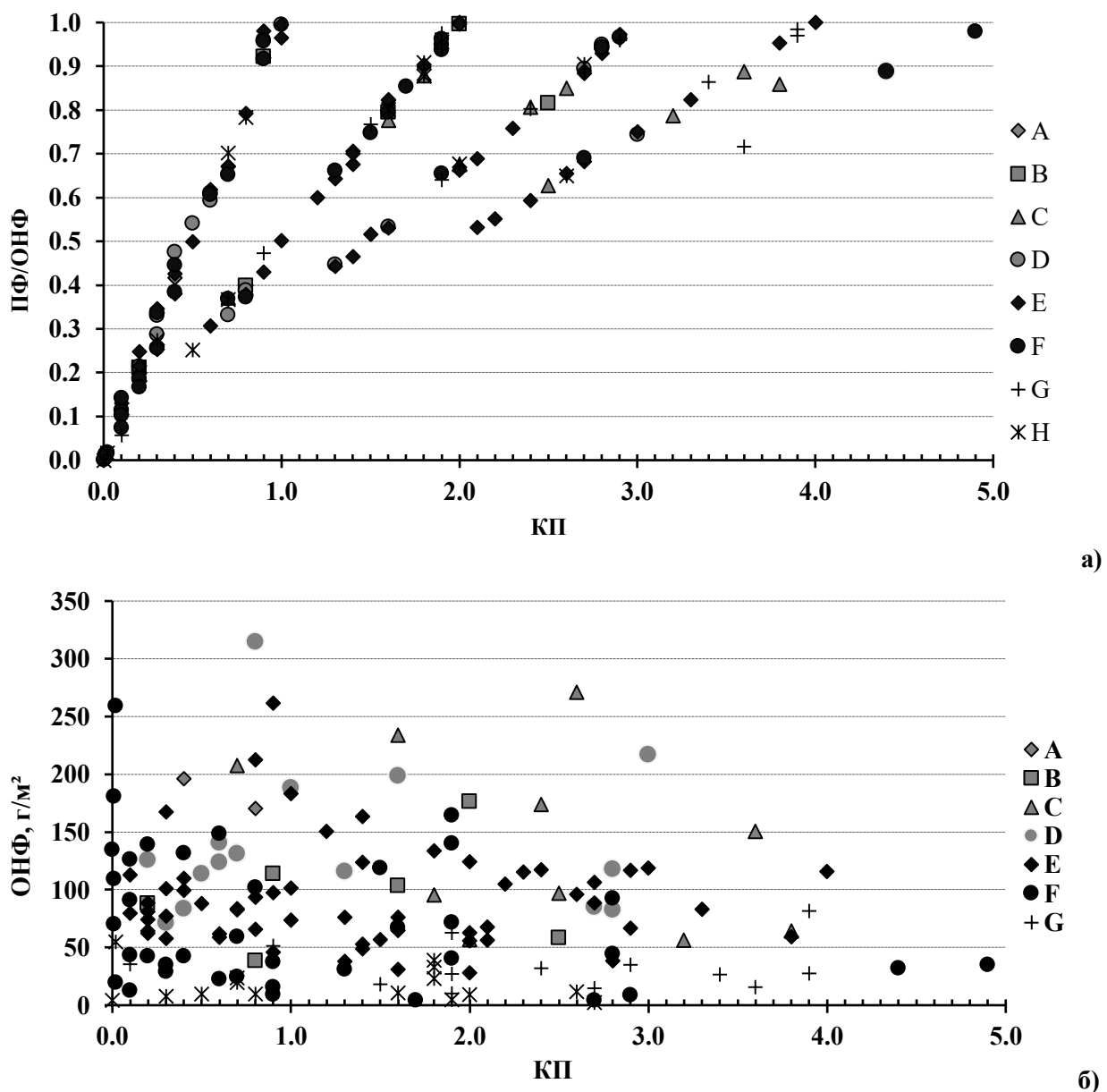
В изученных сообществах надземная фитомасса менялась от 2.1 г/м<sup>2</sup> в пустынных степях, до 314.7 г/м<sup>2</sup> – в луговых. Установлено, что зависимость КП от величины ОНФ, а также от поедаемой её части слабая (рис. 2). Значимыми в данном случае являются соотношение поедаемой и ОНФ к разнообразию поедаемых видов (рис. 3). При одновременных исследованиях с разными условиями увлажнения эти показатели в одном и том же сообществе меняются, однако КП в данных сообществах качественно практически не менялся (рис. 4). Исключением могут быть годы с очень хорошим развитием непоедаемых однолетних видов (*Artemisia scoparia*, *Bassia dasiphylla*, *Chenopodium album*, *Ch. aristatum*, *Salsola collina*), когда КП может значительно снижаться. Для сухостепных сообществ сомонов Баян-Унджул и Баян-Цаган Центрального аймака таким был 2008 г., когда однолетники формировали от 40 до 70% ОНФ. Так, в прутняково-крупноковыльном сообществе (участок 19) КП в 2008 г. снижался до 0.8, тогда как в остальные годы наблюдений составлял 2.7 и выше (рис. 5). Остальные исследованные сообщества в этом районе испытывают сильные пастбищные нагрузки и характеризуются значительным участием непоедаемого кустарничка *Ephedra sinica*. Следует отметить, что в 1970-х гг. этот вид не был отмечен в составе зональных ценозов данного района (Сухие степи МНР, 1988). Экспансия этого вида происходила в течение ряда засушливых лет (2002 и 2005-2007 гг.). В 2008 г. большая часть злаков (*Agropyron cristatum*,

*Cleistogenes squarrosa*, *Koeleria cristata*, *Stipa krylovii*) находилась в покоем состоянии. Как результат, КП в эфедровых с однолетниками сообществах в 2008 г. был очень низким и низким. В благоприятных по условиям увлажнения 2011-2012 гг. отмечено восстановление популяции злаков при снижении фитоценологических показателей эфедры. В части сообществ это отразилось на увеличении КП до среднего и высокого (участки 14 и 27, рис. 5). Внедрение *Ephedra sinica*, как засухоустойчивого вида, по-видимому, обусловлено многолетними колебаниями увлажненности и засушливости территорий (Гунин и др., 2012; Слемнев и др., 2012).



**Рис. 2.** Зависимость КП от общей надземной фитомассы (а) и ее поедаемой части (б). Условные обозначения к рисункам 2 и 3: А – горные луга, В – пойменные луга, С – горно-луговые степи, D – луговые степи, Е – настоящие степи, F – сухие степи, G – опустыненные степи, H – пустынные степи.

Проведенные исследования по кормовой оценке продуктивности пастбищных экосистем Монголии с применением КП показали, что *очень низкая поедаемость* выявлена в растительных сообществах, где долевое участие поедаемых видов в структуре ОНФ составляло от 0 до 44%. При этом, количество поедаемых доминантов, учтенных в КП, не превышало 1, а зачастую такие виды и вовсе отсутствовали. *Низкая поедаемость* пастбищ определялась при наличии 28-40% поедаемых видов в структуре ОНФ, но при этом в составе доминантов отмечалось как минимум по 2 поедаемых вида. При формировании 50-79% поедаемой части в ОНФ количество доминирующих поедаемых видов снижалось до 1, что, как известно, снижает качество пастбищ (Бойков и др., 2002; Jamsranjav et al., 2019). *Средняя поедаемость* определена для сообществ с долей поедаемых видов в ОНФ 41-70% и их количеством в составе доминантов 2-3, а также для монодоминантных сообществ, в котором поедаемые виды составляли более 90% от ОНФ. *Высокой поедаемостью* характеризуются сообщества с долевым участием поедаемых видов 52-100% и наличием 2-5 поедаемых видов-доминантов. В случаях, где доля поедаемых видов не превышала 70% в структуре ОНФ, высокий КП обеспечивался за счет высокого разнообразия поедаемых видов-доминантов (3 и более; рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость КП от отношения поедаемой массы к общей (а) и числа поедаемых доминантов (б).

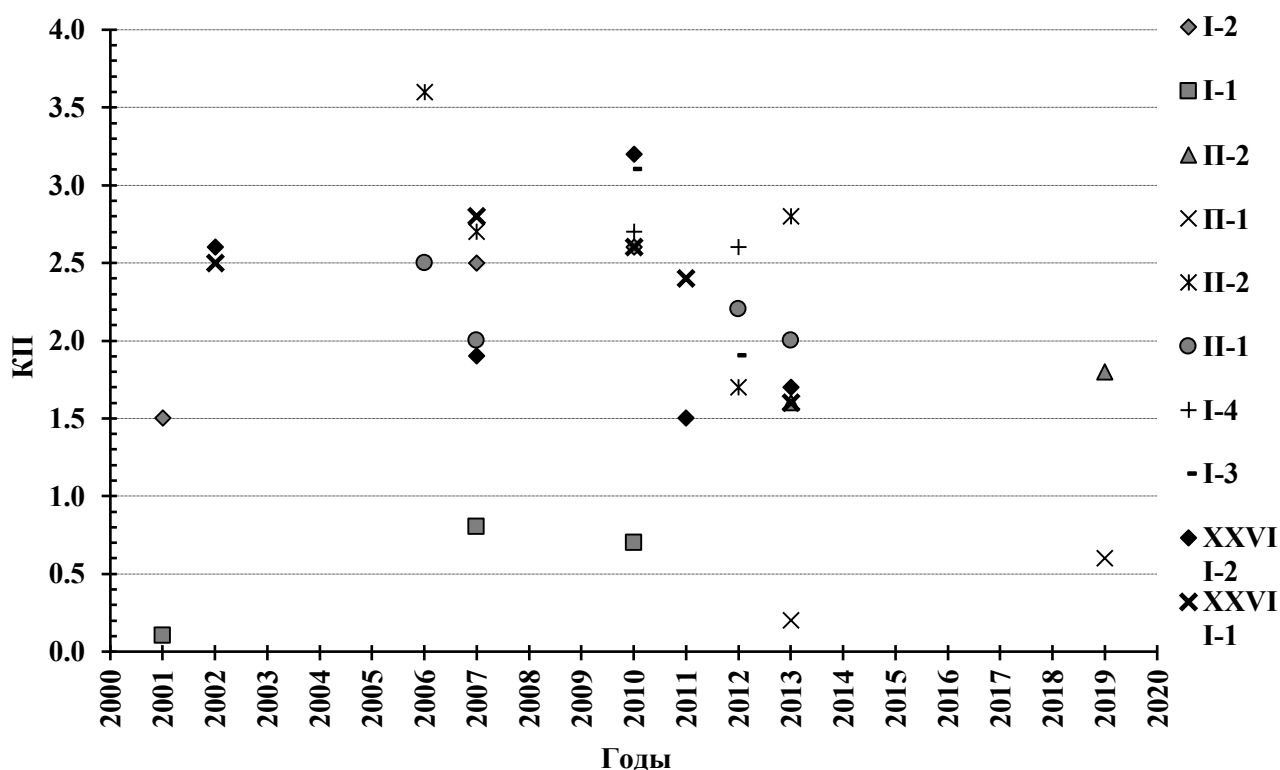


Рис. 4. Динамика КП в сообществах пойменных лугов (I-1, 2, II-1, 2), горно-луговых (II-1, II-2, I-3, I-4) и сухих (XXVII-1, XXVII-2) степей.

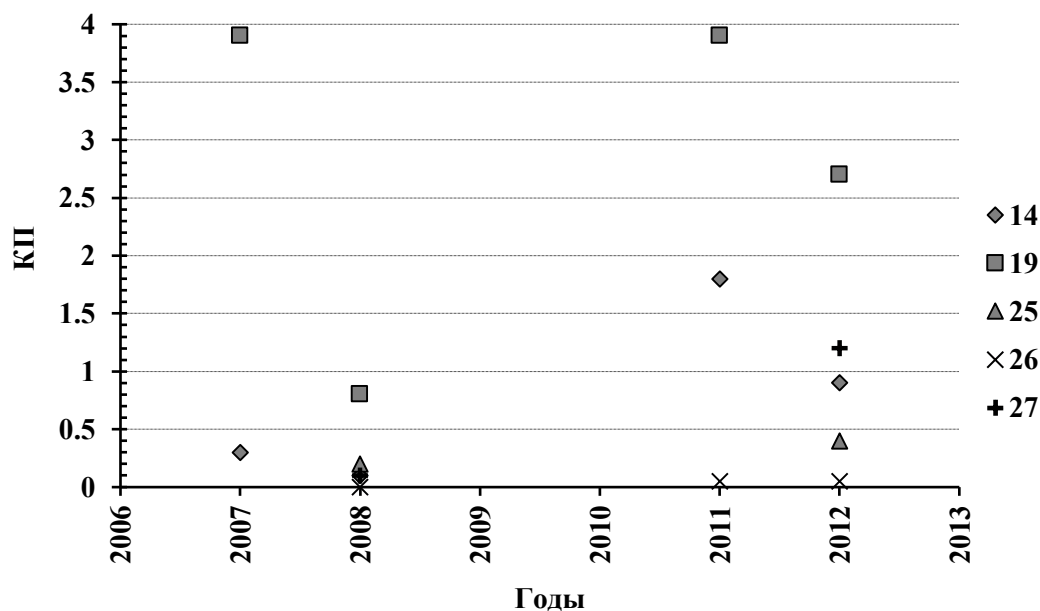


Рис. 5. Динамика КП в сообществах сухих степей сомона Баян-Унджул Центрального аймака.

### Заклучение

Проведенное исследование показало, что значительная часть исследованных нами сообществ имеет высокий КП. Эти сообщества могут относиться к разной степени антропогенной нарушенности



(в том числе и сильной), но для них характерно наличие дигрессивно-активных видов, имеющих удовлетворительную и хорошую поедаемость. Вероятно, этим фактом и поддерживается потенциал к увеличению численности скота в Монголии, имеющего широкий диапазон пищевой предпочтительности. Однако не стоит забывать, что переход пастбищных экосистем к категории непригодных для выпаса может быть довольно быстрым при длительном сохранении нынешних пастбищных нагрузок и аридизации климата (Gao et al., 2015).

Отмечена высокая доля пастбищ с очень низкой и низкой поедаемостью. В большей степени они относятся к сообществам настоящих и сухих степей, испытывающим наибольшую пастбищную нагрузку в Монголии. Выпас на таких пастбищах приводит к замедлению прироста живой массы домашнего скота, в результате чего животное содержится на пастбище более длительное время, что приводит к увеличению поголовья стада, а, следовательно, и пастбищных нагрузок (Gantuya, Udval, 2021). Кроме того, среди сообществ с низким КП отмечены ценозы, находящиеся в режиме длительного отчуждения, при отсутствии выпаса на которых произошло не только восстановление коренных доминантов этих степей, но и снизилось разнообразие и участие других поедаемых видов. Это обстоятельство подтверждает вывод о том, что формирование луговых и степных экосистем происходило под воздействием выпаса, а длительное (более 50 лет) исключение их из хозяйственного использования может привести к их деградации (Абатуров, Молчанова, 2020).

*Финансирование.* Исследование выполнено в рамках Научной программы деятельности Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ по теме 3.1.2. «Оценка деградации растительного покрова степных экосистем с учетом региональных и экономических факторов» и в рамках государственного задания ИПЭЭ РАН по теме «Историческая экология и биогеоценология» (№ 0109-2019-0007).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абатуров Б.Д., Молчанова Л.В. 2020. Естественные степные экосистемы: каковы они на самом деле // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 2. С. 5-25. [Электронный ресурс <http://ecosystemsdynamic.ru/wp-content/uploads/2020/07/1-Абатуров-RUS-articel.pdf> (дата обращения 15.01.2022)].
- Бажа С.Н., Андреев А.В., Данжалова Е.В., Дорофеев Н.И., Дробышев Ю.И., Петухов И.А., Саандарь М., Дугаржав Ч., Адъяа Я., Хадбаатар С. 2020. Динамика наземных природных экосистем Монголии за 1989-2017 гг. // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 3. С. 193-231. [Электронный ресурс <http://ecosystemsdynamic.ru/wp-content/uploads/2020/11/7-Bazha-articel-Rus.pdf> (дата обращения 10.11.2021)].
- Бажа С.Н., Баясгалан Д., Гунин П.Д., Данжалова Е.В., Дробышев Ю. И., Казанцева Т.И., Прищепина А.В., Хадбаатар С. 2008. Особенности пастбищной дигрессии степных экосистем Центральной Монголии // Ботанический журнал. №5. Т. 93. С. 657-681.
- Бажа С.Н., Гунин П.Д., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Казанцева Т.И., Ариунболд Э., Мягмарсүрэн Д., Хадбаатар С., Цэрэнханд Г. 2015. Инвазийные сукцессии как индикатор опустынивания сухих степей на примере Центральной Монголии // Российский журнал биологических инвазий. Т. 8. № 3. С. 2-21.
- Бойков Т.Г., Харитонов Ю.Д., Рупышев Ю.А. 2002. Степи Забайкалья. Продуктивность, кормовая ценность, рациональное использование и охрана. Улан-Удэ: Издательство БНЦ СО РАН. 230 с.
- Грайворонский В.В. 2018. Монголия: пастбищно-кочевое животноводство – рекордный рост скота и экологическая угроза // Азия и Африка сегодня. № 9. С. 49-55. [Электронный ресурс <https://asaf-today.ru/s032150750000691-2-1/> (дата обращения 25.10.2021)].
- Гунин П.Д., Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Дмитриев И.А., Дробышев Ю.И., Казанцева Т.И., Микляева И. М., Огуреева Г.Н., Слемнев Н.Н., Титова С.В., Ариунболд Э., Батцэрэн Ц., Жаргалсайхан Л. 2012. Распространение *Ephedra sinica* в экосистемах сухих степей Восточной и Центральной Монголии // Аридные экосистемы. Т. 18. № 1. С. 18-25. [Gunin P.D., Bazha S.N., Danzhalova E.V., Dmitriev I.A., Drobyshev Yu.I., Kazantseva T.I., Miklyaeva I.M., Ogureeva G.N., Slemnev N.N., Titova S.V., Ariunbold E., Battseren C., Jargalsaikhan L. Expansion of *Ephedra sinica* Stapf. in the arid steppe ecosystems of Eastern and Central Mongolia // Arid Ecosystem. Vol. 2. No. 1. P. 18-33.].
- Гунин П.Д., Дедков В.П., Данжалова Е.В., Бажа С.Н., Золотокрылин А.Н., Казанцева Т.И. 2019. О применении NDVI для мониторинга степных и пустынных экосистем Гоби // Аридные экосистемы. Т. 25. № 3 (80). С. 45-52. [Gunin P.D., Dedkov V.P., Danzhalova E.V., Bazha S.N., Zolotokrylin A.N., Kazantseva T.I. 2019. NDVI for Monitoring of the State of Steppe and Desert Ecosystems of the Gobi // Arid Ecosystem. Vol. 9. No. 3. P. 179-186.].
- Гунин П.Д., Микляева И.М., Бажа С.Н., Слемнев Н.Н., Чердонова В.А. 2003. Особенности деградации и



опустынивания растительных сообществ лесостепных и степных экосистем южного Забайкалья // Аридные экосистемы. Т. 9. № 19-20. С. 7-21.

- Гунин П.Д., Энх-Амгалан С., Ганболд Э., Данжалова Е.В., Баясгалан Д., Цэрэнханд Г., Голованов Д.Л., Петухов И.А., Дробышев Ю.И., Концов С.В., Бажа С.Н., Андреев А.В., Хадбаатар С., Ариунболд Э., Пурэвжав Г. 2009. Особенности деградации и опустынивания пастбищных экосистем Монголии (на примере Среднегобийского аймака) // Ботаникийн хурээлэнгийн эрдэмшин жил гээнийбүтээл. № 21. С. 104-128.
- Зотов А.А., Шамсутдинов Н.З., Хамидов А.А., Шамсутдинов З.Ш., Орловский Н.С. 2009. Методы комплексной оценки природных пастбищных экосистем // Аридные экосистемы. Т. 15. № 2 (38). С. 39-51.
- Казанцева Т.И., Бажа С.Н., Гунин П.Д., Данжалова Е.В., Дедков В.П., Дробышев Ю.И., Дугаржав Ч., Хадбаатар С. 2015. Многолетняя динамика растительных сообществ сухих и пустынных степей Центральной Монголии (на примере Увэрхангайского аймака) // Ботанический журнал. Т. 100. № 3. С. 249-270.
- Калинина А.В. 1974. Основные типы пастбищ Монгольской Народной Республики (их структура и продуктивность). Л.: Наука. 188 с.
- Куркин К.А., Комахин П.И., Коптелова С.Г. 1998. Оценка качества естественных сенокосов по данным геоботанических описаний // Ботанический журнал. Т. 83. № 12. С. 53-65.
- Сафронова И.Н., Нарантуяа Н. 2016. О современном состоянии пастбищ в Завханском аймаке (Монголия) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета. № 15. С. 34-37.
- Слемнев Н.Н., Шереметьев С.Н., Гамалей Ю.В., Степанова А.В., Чеботарева К.Е., Цогт З., Цоож Ш., Ярмишко В.Т. 2012. Изменчивость радиальных приростов деревьев и кустарников Монголии в связи с динамикой климата // Ботанический журнал. Т. 97. № 7. С. 852-871.
- Содном М. 1968. Результаты исследований по установлению суточной нормы пастбищного кормления мелкого рогатого скота // Ходоо аж ахун (Сельское хозяйство). № 4. С. 7-11. (на монг. яз.).
- Степи Центральной Азии. 2002. / Ред. В.А. Хмелев. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 299 с.
- Сухие степи МНР. Ч. 2. Стационарные исследования (сомон Унджул). 1988. / Ред. Е.М. Лавренко. Л.: Наука. 240 с.
- Тувшинтогтох И. 2014. Монгол орныхээрийнургамагжил [Tuvshintogtokh I. The steppe vegetation of Mongolia]. Улаанбаатар: Бэмбисан. 610 с. (На монг. яз.).
- Уртнасан М., Любарский Е.Л. 2015. Пастбищная дигрессия в сухих степях северной части Центральной Монголии // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. Барнаул: Изд-во Алтайский гос. ун-т. № 14. С. 115-117.
- Цаценкин И.А., Юнатов А.А. 1951. Естественные кормовые ресурсы МНР. Восточная часть Гоби. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 350 с.
- Юнатов А.А. 1954. Кормовые растения пастбищ и сенокосов МНР. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 352 с.
- Angerer J.P. 2012. Gobi forage livestock early warning system // Conducting national feed assessments, FAO. Animal Production and Health Manual No. 15. Rome, Italy. P. 115-130 [Электронный ресурс <https://www.fao.org/3/i3043e/i3043e.pdf> (дата обращения 5.11.2021)].
- Bat-Oyun T., Shinoda M., Tsubo M. 2010. Estimation of pasture productivity in Mongolian grasslands: field survey and model simulation // Journal of Agricultural Meteorology. No. 66 (1). P. 31-39.
- Damiran D. 2005. Palatability of Mongolian Rangeland Plants. Circular of Information № 3. Union, OR, USA: Eastern Oregon Agricultural Research Center, Oregon State University. 91 p
- Fujita N., Ariunbold E. 2014. Plant Diversity and Productivity of Mongolian Nomadic Pasture in Relation to Land Use // Social-Ecological Systems in Transition. Global Environmental Studies. Tokyo: Springer. P. 71-87.
- Gantuya J., Udval G. 2021. Effect of rangeland production and quality for livestock body weight // Mongolian Journal of Agricultural Sciences. Vol. 34. № 3. P. 39-48. [Электронный ресурс <https://mongoliajol.info/index.php/MJAS/article/view/1918> (дата обращения 5.11.2022)].
- Gao W., Fernandez-Gimenez M.E., Angerer J.P., Reid R.S. 2015. Is overgrazing a pervasive problem across Mongolia? An examination of livestock forage demand and forage availability from 2000 to 2014 // Proceedings of the Transdisciplinary Research Conference: Building Resilience of Mongolian Rangelands, Ulaanbaatar Mongolia. P. 35-41. [Электронный ресурс <https://www.researchgate.net/publication/312728340> (дата обращения 1.11.2021)].
- Jamsranjav C., Fernandez-Gimenez M.E., Reid R.S., Adya B. 2019. Opportunities to integrate herders' indicators into formal rangeland monitoring: an example from Mongolia // Ecological Applications. Vol. 29. № 5. P. e01899. 10.1002/eap.1899.
- Jigjidsuren S., Johnson D.A. 2008. Forage plants in Mongolia. Ulaanbaatar. Admon. 563 p.
- Karnieli A., Bayarjargal Y., Bayasgalan M., Mandakh B., Dugarjav Ch., Burgheimer J., Khudulmur S., Bazha S.N., Gunin P.D. 2013. Do vegetation indices provide a reliable indication of vegetation degradation? A case study in Mongolian pastures // International Journal of Remote Sensing. Vol. 34. № 17. P. 6243-6262.

- Mongolian statistical yearbook 2020. 790 P. [Электронный ресурс [https://www.1212.mn/BookLibraryDownload.ashx?url=Yearbook2020.all\\_link..pdf&ln=Mn](https://www.1212.mn/BookLibraryDownload.ashx?url=Yearbook2020.all_link..pdf&ln=Mn) (дата обращения 19.11.2021)].
- Muller F.V., Bold B.* 1996. On the Necessity of Regulations for Pastoral Land Use in Mongolia // Applied Geography and development. Institute For Scientific Co-operation. Tubingen. FRG. Vol. 48. P. 29- 51.
- Nanzad L., Zhang J, Batdelger G., Sharma Pangali T.P., Koju U.A., Wang J., Nabil M.* 2021. Analyzing NPP Response of Different Rangeland Types to Climatic Parameters over Mongolia. Agronomy. Vol. 11. P. 647.
- The Plant List. 2022 [Электронный ресурс <http://www.theplantlist.org/> (дата обращения 10.01.2022)].

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОЛЬЕРНОГО СОДЕРЖАНИЯ ЖИВОТНЫХ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ

© 2023 г. А.А. Гобарова, К.Ш. Казеев, А.В. Жадобин, А.Н. Федоренко, С.И. Колесников

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета  
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 194/1. E-mail: kamil\_kazeev@mail.ru

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 10.01.2023. Принята к публикации 13.01.2023.

Животные в процессе жизнедеятельности оказывают значительное влияние на территорию, где обитают. Исследуемые объекты находятся в зоне сухих степей, где климатические условия лимитируют развитие растительности, способствуют изменениям почвенных характеристик, что в сочетании с воздействием животных усиливает эффект. Цель работы оценить влияние животных на экологическое состояние почв вольеров Ассоциации «Живая природа степи».

В ходе исследования были определены основные показатели экологического состояния почв вольеров с животными на территории вольеров Ассоциации «Живая природа степи» в засушливых районах Ростовской области. Исследовали вольеры разных размеров, с африканскими страусами (*Struthio camelus*), эму (*Dromaius novaehollandiae*), козлами (*Capra* sp.), лошадьми Пржевальского (*Equus ferus przewwalskii*) и сайгаками (*Saiga tatarica*), и на территории с полувольным выпасом копытных животных – лошадей (*Equus caballus*), верблюдов (*Camelus bactrianus*), буйволов (*Bubalus arnee*), яков (*Bos mutus*) и лам (*Lama ganicoe*). Исследуемые участки отличались интенсивностью деградации почв. Для оценки физического состояния определяли влажность, температуру, плотность и структурность почвы, также была произведена оценка рН, валового химического состава почв, содержания гумуса и биологической активности, было проведено ранжирование участков по степени пастбищной дигрессии.

В ходе исследования вольер с африканскими страусами получил максимальную 10 степень деградации, что характеризуется сильным угнетением растительности и сбитостью почв. Также плотность почвы в вольере с африканскими страусами была наибольшей – 1.49 г/см<sup>3</sup>, процент структурности наименьшим – 37%. Данные параметры имели тесную отрицательную корреляцию с давлением копыт и лап животных на почву (-0.9). Уровень влажности на исследуемых участках не поднимался выше 11%, несмотря на это ферментативная активность почв зависела больше не от гидротермических условий, а от влияния выделений продуктов жизнедеятельности животных. В вольерах с копытными животными, в частности в вольере с козлами, активность каталазы и уреазы всегда была выше, чем на остальных участках. Там же было отмечено высокое содержание гумуса – 10.3%, что является нехарактерным для каштановых почв и подтверждает влияние на них жизнедеятельности животных.

По результатам исследований наиболее низкие значения структурности, гумуса и биологической активности, а также повышенная плотность сложения почвы были в вольере с африканским страусом. Полученные данные объясняют уменьшение роста и развития растительности на территории, где обитают содержащиеся в скученных условиях животные.

**Ключевые слова:** пастбищная дигрессия, экологическое состояние, ферментативная активность, биоиндикация, содержание гумуса, физические свойства.

**DOI:** 10.24412/1993-3916-2023-2-109-117

**EDN:** WRCBNN

Сохранение биоразнообразия на нашей планете является одной из важных задач в настоящее время. С этой целью создаются различные заповедники, заказники, ассоциации и т.д. На территории Ростовской области с 2004 г. существует общественная экологическая организация – ассоциация «Живая природа степи», основными целями которой являются охрана и восстановление естественного биоразнообразия степи, создание искусственных популяций исчезающих степных

животных, пропаганда рационального использования ресурсов природы и формирование экологической культуры среди населения области. Ассоциация активно работает с ведущими природоохранными организациями – ЮНЕСКО, ТАСИС, WWF, научными учреждениями РАН, вузами и др., выступает инициатором проведения российских и международных научно-практических конференций. Благодаря разработанной инновационной технологии по искусственному разведению сайгака, Центр редких животных европейских степей в Ассоциации стал ведущим по сохранению этих животных. В настоящее время в Центре успешно проводятся работы по содержанию лошади Пржевальского, бизонов, верблюдов, куланов, яков, антилоп Канна, буйволов, которые демонстрируют значительный прирост (буйволы – на 90%, верблюды – на 70%, антилопы Канна – на 90%, лошади Пржевальского – на 70%; Ассоциация «Живая природа степи», 2022). Территория находится в зоне сухих степей на востоке Ростовской области, с характерными для нее аридными почвами. Климатические условия лимитируют развитие растительности, также обуславливая небольшой объем фитомассы. Вместе с этим важно осуществлять мониторинг за состоянием окружающей среды на территории, где обитают животные. Выпас может изменить баланс структуры, состава и функций экосистем, путем непосредственного механического воздействия на почву, внесения продуктов жизнедеятельности, изменения состава растительных сообществ и т.д. (Wiesmeier et al., 2009; Zhou et al., 2010; Chen et al., 2019). Ранее проведенные исследования в зоопарках, заповедниках и на других территориях, где содержатся животные, подтверждают их исключительное влияние на растительно-почвенный покров (Yurkova, 2009; Ганиева и др., 2019; Власенко и др., 2019; Гобарова и др., 2020; Zhadobin et al., 2020; Kazeev et al., 2021). При увеличении интенсивности выпаса снижается доля водоустойчивых агрегатов и скорость инфильтрации, происходит увеличение плотности сложения почвы и сопротивление пенетрации, снижается биомасса растений и микробная активность в почве (Hoffmann et al., 2008; Steffens et al., 2008).

Целью работы было оценить влияние животных на экологическое состояние почв вольеров Ассоциации «Живая природа степи».

### Материалы и методы

Исследования проводили в августе 2021 года на территории вольерного комплекса Ассоциации «Живая природа степи» Орловского района Ростовской области (46° 24' 40.1" с.ш., 42° 38' 36.5" в.д.). Климат характеризуется жарким летом и холодной, малоснежной зимой. Средняя месячная температура воздуха в январе – -5.5°C, в июле – 24.4°C. Максимальная температура летом поднимается до +43°C. Количество осадков – от 379 до 422 мм в год. Почвенный покров представлен каштаново-солонцовыми комплексами с лугово-каштановыми почвами в понижениях рельефа. Сложность почвенного покрова обуславливает чрезвычайно высокие показатели варьирования значений показателей состава и свойств почв. Главные черты диагностики каштановых почв: малая гумусность гуматно-фульватного типа с мощностью гумусового горизонта около 40-50 см, слабая выщелоченность от легкорастворимых солей с формированием иллювиального карбонатно-деструктивного горизонта и горизонта гипса и легкорастворимых солей. Солонцы – интразональные образования зоны сухих степей с каштановыми почвами. Образуют комплексную структуру почвенного покрова с контрастными по экологии и плодородию почвами (каштановые, лугово-каштановые и солонцы) с разным содержанием компонентов комплекса. Солонец каштановый является автоморфной почвой, формируется без участия грунтовых вод под злаково-полынными растительными группировками (полынь черная, кермек, типчак и др.; Казеев и др., 2010). Значительную долю надземной фитомассы формируют злаки (54-66%) и разнотравье (32-46%). Доля других видов сосудистых растений: осоковых – осоки узколистной (*Carex stenophylla*<sup>1</sup>), бобовых – горошка четырехсемянного (*Vicia tetrasperma*), а также спорыша раскидистого (*Polygonum patulum*) не превышает 3.9% (Казьмин и др., 2016). Растительность пастбищного участка представлена комплексом из 6 компонентов: луковичномятликово-житнякового (*Agropyron desertorum*, *Poa bulbosa*), кострцевого (*Bromopsis inermis*) и однолетникового (*Descurainia sophia*, *Sisymbrium loeselii* – летом, *Atriplex aucheri*, *A. tatarica*, *Bassia sedoides* – осенью) фитоценозов на

<sup>1</sup> Латинские названия растений приводятся по работе С.К. Черепанова (1995).

каштановых почвах; полынно-злакового (*Agropyron cristatum*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia austriaca*) и луковичномятликово-полынного (*Artemisia austriaca*, *Poa bulbosa*) на лугово-каштановых почвах; лерхопопынного (*Artemisia lerchiana*) на солонцах каштановых (Джапова и др., 2020).

Контрольный участок расположен на территории Ассоциации на удалении в 3 км от вольеров, с минимальным животным и антропогенным воздействием (рис. 1). Образцы почвы для анализов были взяты из вольеров с: африканскими страусами (*Struthio camelus*<sup>2</sup>), эму (*Dromaius novaehollandiae*), козлами (*Capra* sp.), лошадьми Пржевальского (*Equus ferus przewalskii*) и сайгаками (*Saiga tatarica*), а также на территории с полувольным выпасом копытных животных – лошадей (*Equus caballus*), верблюдов (*Camelus bactrianus*), буйволов (*Bubalus arnee*), яков (*Bos mutus*) и лам (*Lama ganicoe*).

Исходя из площади вольера, веса животных и их количества была рассчитана нагрузка, осуществляемая животными в процессе их жизнедеятельности на ограниченной территории. Соотношение количества животных и их общей массы, которой они осуществляют нагрузку на поверхность почвы, к площади вольеров, показывает силу воздействия этого фактора изменение почвенных свойств. Также была проведена ранжировка исследуемых участков по степени пастбищной дигрессии согласно шкале Л.Г. Раменского с соавторами (1956; табл. 1).



**Рис. 1.** Расположение объектов исследования: 1 – африканские страусы, 2 – эму, 3 – козлы, 4 – копытные на полувольном выпасе, 5 – лошади Пржевальского и сайгаки, 6 – контроль.

В рамках работы был проведен анализ показателей эколого-биологического состояния почв с помощью полевых и лабораторных методов в соответствии с разработанной методологией эколого-биологического состояния почв (Казеев и др., 2016). В полевых условиях была измерена температура почвенного покрова с помощью электронного термометра HANNA СНЕСТЕМР послойно на глубине 0, 5, 10 см, влажность почвы – влагомером Fieldscout TDR 100 в 10-кратной повторности, плотность сложения почвы определяли объемно-весовым методом с использованием стальных колец объемом 135 см<sup>3</sup> в 3-кратной повторности. Аналитические исследования проводили на кафедре экологии и природопользования Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия). Структурный анализ почвы проводился с использованием сухого просеивания почвы через колонну сит с ячейками от 10 мм до 0.25 мм. Качество структуры почвы оценивали по процентному содержанию суммы агрегатов почв размером менее 10 и более 0.25 мм от общей суммы агрегатов.

<sup>2</sup> Латинские названия животных приводятся по сайту Систематического списка коллекции животных Ростовского-на-Дону зоопарка (2022).

Реакцию почвенной среды (рН) и окислительно-восстановительный потенциал определяли потенциометрическим методом (HANNA HI 98128 рНер 5, Германия) в почвенной суспензии с соотношением почва: вода – 1: 2.5. Содержание легкорастворимых солей определяли кондуктометрическим методом на основе электропроводности (ЕС) по прибору HANNA HI 9034. Активность каталазы определяли газометрическим методом по А.Ш. Галстяну (1978), активность уреазы – модифицированным методом А.Ш. Галстяна (1978) с использованием реактива Несслера, активность инвертазы – колориметрическим методом с реактивом Феллинга. Активность почвенных ферментов изучали при естественном рН почвы без буфера в 3-6-и кратной повторности. Определение содержания органического углерода почвы проводили методом И.В. Тюрина в модификации Б.А. Никитина. Вариационно-статистическая обработка полученных данных выполнена с применением корреляционного, вариационного и дисперсионного анализов, с использованием программ Statistica for Windows 10.0 и MS Excel.

**Таблица 1.** Условия содержания животных в вольерах ассоциации «Живая природа степи».

Участок	Координаты	Площадь вольера, м <sup>2</sup>	Животные	Масса животных, кг	Нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	Степень пастбищной дигрессии (шкала Раменского)
1	46° 24' 6.27" с.ш., 42° 38' 53.9" в.д.	600	Африканские страусы ( <i>Struthio camelus</i> )	936	1.56	10
2	46° 24' 6.26" с.ш., 42° 38' 53.9" в.д.	600	Эму ( <i>Dromaius novaehollandiae</i> )	220	0.37	9
3	46° 24' 6.26" с.ш., 42° 38' 53.9" в.д.	600	Козлы ( <i>Capra sp.</i> )	455	0.76	8
4	46° 24' 6.26" с.ш., 42° 38' 53.9" в.д.	20000000	Лошади ( <i>Equus caballus</i> ), верблюды ( <i>Camelus bactrianus</i> ), яки ( <i>Bos mutus</i> ), ламы ( <i>Lama ganicoe</i> ), буйволы ( <i>Bubalus arnee</i> )	101450	0.01	1-2
5	46° 41' 17.9" с.ш., 42° 61' 9.15" в.д.	630000	Лошади Пржевальского ( <i>Equus ferus przewalskii</i> ), сайгаки ( <i>Saiga tatarica</i> )	28882	0.05	1-2
6	46° 40' 6.84" с.ш., 42° 60' 48.6" в.д.	–	Контроль	–	–	1-2

### Результаты и обсуждение

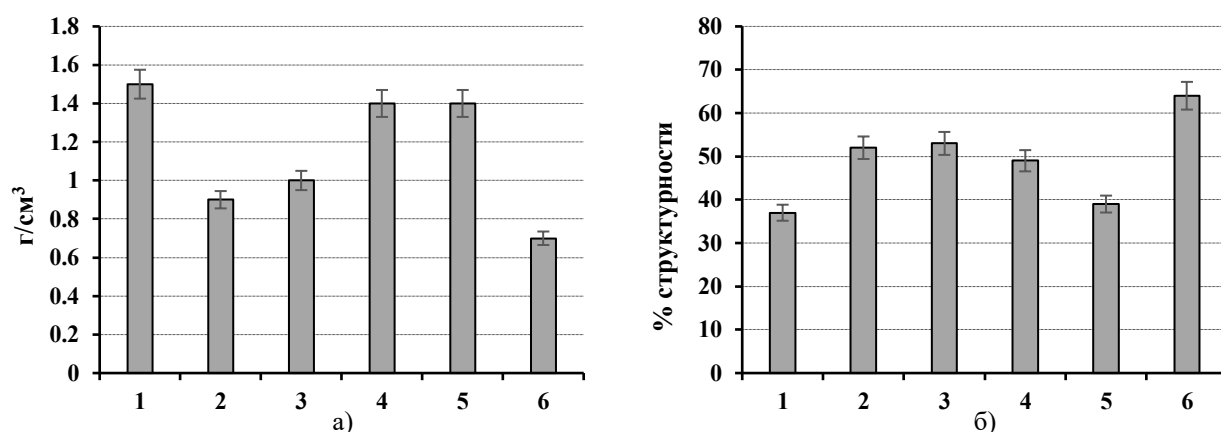
Реакция почвенной среды на исследуемых участках нейтральная, что характерно для каштановых почв. Для гидротермического режима почвы на момент проведения исследования характерны значения температуры почвы на глубине 5 см в диапазоне от 24.9 до 32.5°C, и значения влажности почвы – от 3 до 11% (табл. 2).

Обитая на ограниченной территории, животные видоизменяют ее путем вытаптывания и потребления растительности, а также уплотнения почвенного покрова. Исследованные участки отличаются разной степенью пастбищной дигрессии (табл. 1). Используя шкалу Л.Г. Раменского с соавторами (1956), была дана оценка состояния территории – вольер с африканскими страусами на 10 ступени: растительность полностью отсутствует; вольер с эму на 9 ступени: растительный покров изрежен, представлен спорышом (*Polygonum aviculare*); вольер с козлами на 8 ступени: растительный покров представлен сбоевыми однолетниками; вольер с сайгаками и лошадьми Пржевальского, а также территория с полувольным выпасом животных и контрольный участок на 1-2 ступени: отличается высоким травостоем (30-150 см) представленным злаковой или злаково-разнотравной

растительностью. Изменения в растительном сообществе связаны с физическими свойствами почв. В результате изменения плотности почвенного покрова меняется характер растительного сообщества на плохо поедаемые и ядовитые виды трав, которые способны расти даже в таких условиях из-за особенностей строения корневой системы. В результате снижается интенсивность использования таких территорий животными (Русанов, 2011). Согласно исследованиям зарубежных ученых, выпас оказывает влияние на верхний слой почвы через воздействие на объем и размер пор, и связность почвы, что ведет к повышению плотности сложения почв на территории (Parwada, Van Tol, 2019; Levi et al., 2020). Результаты исследования показали уплотнение почвы на исследуемых участках по сравнению с контролем (рис. 2а).

**Таблица 2.** Некоторые характеристики почв исследуемых участков.

№	Вольеры	Температура (глубина 5 см), °С	Влажность, %	pH	Гумус, %
1	Африканские страусы	28.4	8.4	7.3	4.2
2	Эму	24.9	8.3	7.2	6.4
3	Козлы	27.1	11.0	6.8	10.3
4	Лошади, верблюды, яки, ламы, буйволы	30.9	3.4	6.4	4.1
5	Лошади Пржевальского, сайгаки	32.5	5.4	6.7	3
6	Контроль	25.9	9.7	5.8	6.7

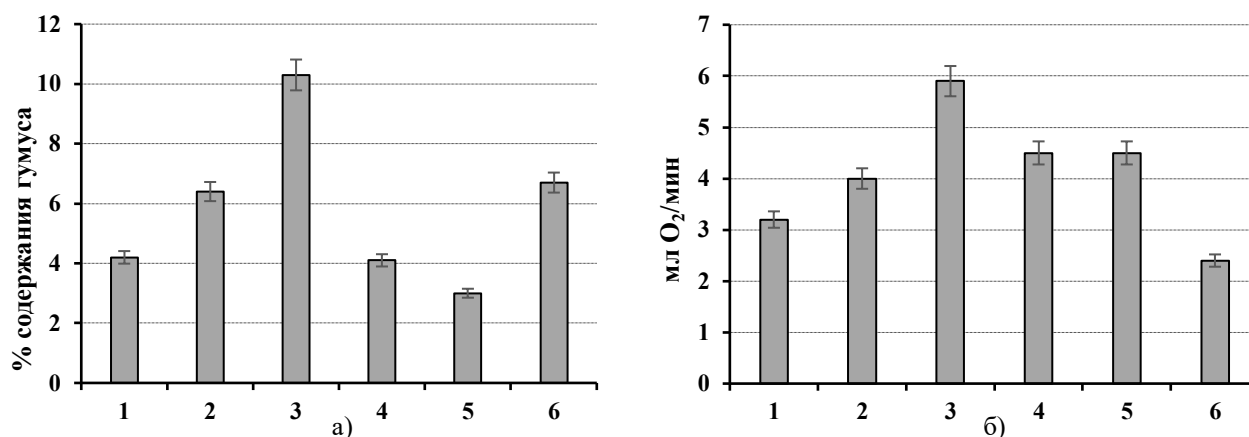


**Рис. 2.** Плотность (а) и структурность (б) почв исследуемых участков: 1 – африканские страусы, 2 – эму, 3 – козлы, 4 – копытные на полувольном выпасе, 5 – лошади Пржевальского и сайгаки, 6 – контроль.

Значения выше остальных получены в вольере с африканскими страусами, в то время как эму оказали наименьшее влияние на данный параметр. Значения показателя в вольерах с копытными животными также имеют высокие значения, превышающие оптимальные для благоприятного роста и развития растений. Переуплотнение происходит вследствие нарушения почвенной структуры под давлением копыт и лап животных, что подтверждает полученная высокая отрицательная корреляция между этими параметрами –  $r = -0.9$ . Увеличение плотности почвы и изменение размера почвенных агрегатов влияют на распространение корней и доступ питательных веществ к растениям. В агрономическом смысле наиболее ценными считаются агрегаты размером от 0.25 до 10 мм, при интенсивном физическом воздействии животными на почвенный покров происходит увеличение количества глыбистых агрегатов. Согласно шкале для оценки структурного состояния почвы по системе Росгипрозема (1995-2000; Вальков и др., 2004), на исследуемых участках наблюдается удовлетворительное (60-40%) и неудовлетворительное (40-20%) структурное состояние почв

(рис. 2б). Наименьшие значения были получены в образцах из вольера с африканскими страусами и на территории свободного выпаса лошадей Пржевальского с сайгаками – 37% и 39% соответственно. Результаты коррелируют со значениями нагрузки, оказываемой животными на почву за счет их веса и площади территории. Умеренная обратная связь отражает зависимость, заключающуюся в уменьшении коэффициента структурности с увеличением нагрузки животных на почву –  $r = -0.4$ . Таким образом, прослеживается прямое влияние животных на физические параметры почвы.

Через изменение растительного сообщества выпас животных оказывает влияние на изменения в сообществе почвенных микроорганизмов и их активности (Garcia-Franco et al., 2015). Это в дальнейшем повлияет на стабильность почвенных агрегатов, т.к. высокая численность почвенных бактерий способствует объединению частиц разных размеров, т.е. образованию макроагрегатов из микроагрегатов, и повышает стабильность агрегатов. Было установлено, что поступление питательных веществ и корни растений влияют на стабильность почвенных агрегатов через бактериальное сообщество (Zhao et al., 2018). Структура почвы – трехмерная, образующаяся внутри и между агрегатами – является важным показателем качества почвы (Menon et al., 2020). Почвенные агрегаты являются основными единицами структуры почвы и служат основными носителями почвенного органического углерода и питательных веществ почвы (Sarker et al., 2018). Их формирование, стабилизация и фрагментация определяют, насколько хорошо функционирует почва, поскольку размер агрегатов является наиболее важным фактором, определяющим способность удерживать питательные вещества в почве (Lu et al., 2019). Почвенный гумус влияет на ферментативную активность почвы, это проявляется в его воздействии на жизнедеятельность почвенных организмов и растений, т.к. в гумусе накоплены основные запасы питательных веществ и биогенных элементов (Хазиев, 2018). Полученные результаты по содержанию гумуса в исследуемых вольерах отражают значительное повышение показателя в вольере с козлами – 10.3%, относительно характерных для данных почв значений, обычно не превышающих 3.5%. Наименьшие значения получены на территории свободного выпаса лошадей Пржевальского и сайгаков – 3% (рис. 3а). Согласно шкале Л.А. Гришиной и Д.С. Орлова (1978), содержание гумуса на исследуемой территории находится в диапазоне от низких до очень высоких значений. Для каштановых почв очень высокое содержание гумуса (>10%) является нехарактерным явлением, и свидетельствует о внесении большого количества органических остатков, т.к. гумусовые вещества формируются из веществ растительных и животных остатков, тел микроорганизмов и продуктов метаболизма всей биоты во взаимодействии с комплексом компонентов окружающей среды.

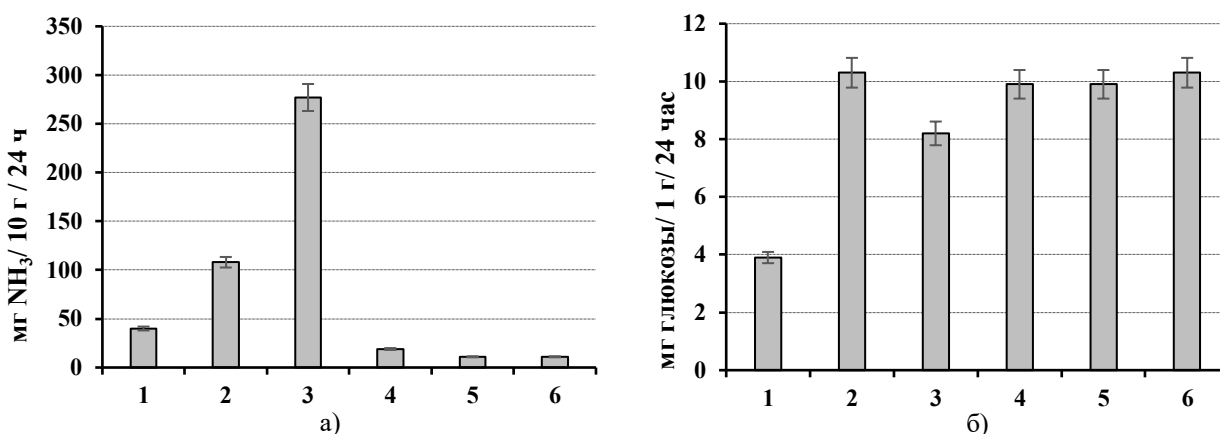


**Рис. 3.** Содержание гумуса (а) и активность каталазы (б) в почвах исследуемых участков: 1 – африканские страусы, 2 – эму, 3 – козлы, 4 – копытные на полувольном выпасе, 5 – лошади Пржевальского и сайгаки, 6 – контроль.

Ферменты являются надежными индикаторами метаболизма почвенных микроорганизмов, отражают изменения в структуре микробного сообщества и косвенно регулируют питательные вещества почвы и микроорганизмов (Xiao et al., 2020). Согласно шкале Д.Г. Звягинцева по степени обогащенности почвы ферментами (1978), полученные результаты свидетельствуют о средней



обогащенности почв каталазой на территории с животными (рис. 3б). По данным исследователей активность ферментов сильно зависит от гидротермического режима почв (Хазиев, 2018). Наиболее оптимальные условия для протекания биохимических реакций в почве соответствуют температуре 20-30°C и влажности 40-60%. Для почв сухостепных районов более важен уровень влажности, который на исследуемых участках не поднимался выше 11%, что способствовало замедлению ферментативных процессов. Кроме явного влияния гидротермического режима, отмечено влияние животных. Активность фермента была выше в вольерах с копытными животными, в то время как в вольере с африканскими страусами, а также у эму активность понижалась. Исследованиями подтверждено влияние навоза млекопитающих на активность ферментов, т.к. с привнесением органического вещества животного происхождения стимулируется почвенная микробиота посредством обеспечения ее одновременно углеродом и азотом (Marinari et al., 2006). Активность уреазы также была высокой в вольере с копытными животными, а именно на территории, где обитают козлы (рис. 4а). Степень обогащенности ферментом в вольере с козлами отмечена как очень богатая. В то же время на территории, где обитают другие копытные животные, степень ниже на два порядка (соответствует средней обогащенности), что обусловлено меньшей плотностью животных в данных вольерах. Активность уреазы в вольере с африканскими страусами была ниже, чем в вольере с эму в 2.7 раза, что наглядно подтверждает разницу в нагрузке птиц на почвенный покров и согласуется со сделанными ранее выводами по степени дигрессии. Активность инвертазы была одинаковой на исследуемых участках, кроме вольера с африканскими страусами, где степень обогащенности фермента соответствует бедной по шкале Д.Г. Звягинцева (1978). Птичий помет отличается от навоза своей высокой концентрированностью, что негативно влияет на корни растений, способствуя угнетению роста и развития растений, которые в данном случае являются основным источником органического вещества почв, обеспечивающего углеродсодержащими соединениями.



**Рис. 4.** Активность уреазы (а) и инвертазы (б) в почвах исследуемых участков: 1 – африканские страусы, 2 – эму, 3 – козлы, 4 – копытные на полувольном выпасе, 5 – лошади Пржевальского и сайгаки, 6 – контроль.

### Выводы

Изменение почвенно-растительного покрова и свойств почв вольеров Ассоциации «Живая природа степи» зависит от площади вольеров, видов и количества содержащихся в них животных. При содержании животных в скученных условиях происходит вытаптывание растений и переуплотнение почв на некоторых участках, что влечет за собой изменение биологической активности. Наиболее разрушительное воздействие на почву оказывают африканские страусы, в маленьком вольере которых отмечена максимальная нагрузка. В вольерах большего размера, где обитают лошади Пржевальского и сайгаки и на территории с полувольным выпасом животных не отмечено переуплотнения почвы и изменения биологической активности почв, вследствие меньшей нагрузки осуществляемой животными. В небольшом вольере с козлами отмечено увеличение содержания органического углерода и биологической активности почв по сравнению с другими вольерами вследствие поступления большого объема отходов жизнедеятельности.

*Финансирование.* Исследования проведены при финансовой поддержке ведущей научной школы Российской Федерации «Оценка и прогноз состояния почв при различных антропогенных воздействиях и изменении климата» (НШ-449.2022.5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ассоциация «Живая природа степи». 2022. [Электронный ресурс <https://xn--80ahejd6affdbom.xn--p1ai/zhivaya-prigoda-stepi/> (дата обращения 11.02.2022)].
- Вальков В.Ф., Елисеева Н.В., Имгрунт И.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И. 2004. Справочник по оценке почв. Майкоп: ГУРИПП «Адыгея». 236 с.
- Власенко М.В., Кулик А.К., Салугин А.Н. 2019. Оценка экологического состояния и потерь продуктивности аридных пастбищных экосистем Сарпинской низменности // Аридные экосистемы. Т. 25. № 4 (81). С. 71-81. [Vlasenko M.V., Kulik A.K., Salugin A.N. 2019. Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 4. P. 273-281.].
- Ганиева С.А., Дюньмалиева Н.Я., Рамазанова Ф.М. 2019. Влияние выпаса на свойства почв в условиях сухих субтропических степей Азербайджана // Аридные экосистемы. Т. 25. № 3 (80). С. 39-44. [Ganieva S.A., Dyunyamalieva N.Ya., Ramazanova F.M. Grazing Effect on Soil Properties in Dry Subtropic Steppes of Azerbaijan // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 3. P. 174-178.].
- Гобарова А.А., Жадобин А.В., Казеев К.Ш., Федоренко А.Н., Колесников С.И. 2020. Сравнительная оценка методов при мониторинге почв в вольерах Ростовского-на-Дону зоопарка // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. № 3 (207). С. 91-97.
- Гришина Л.А., Орлов Д.С. 1978. Система показателей гумусного состояния почв // Проблемы почвоведения. М. С. 42-47.
- Джапова В.В., Бембеева О.Г., Аюшева Е.Ч., Казьмин В.Д., Джапова Р.Р., Абатуров Б.Д. 2020. Кормовая избирательность полувольных бизонов (*Bison bison*) в дерновиннозлаковой степи долины Западного Маныча // Аридные экосистемы. Т. 26. № 4 (85). С. 59-65. [Dzhapova V.V., Bembeeva O.G., Ayusheva E.Ch., Kazmin V.D., Dzhapova R.R., Abaturov B.D. Forage Selectivity of Semi-Free-Roaming Bison (*Bison bison*) in Sod-Forming Cereal Steppes in the Western Manych River Valley // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 4. P. 305-311.].
- Звягинцев Д.Г. 1978. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. № 6. С. 48-54.
- Казеев К.Ш., Вальков В.Ф., Колесников С.И. 2010. Атлас почв Юга России. Ростов н/Д: Изд-во «Эверест». 128 с.
- Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. 2016. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. 356 с.
- Казьмин В.Д., Абатуров Б.Д., Демина О.Н., Колесников М.П. 2016. Кормовые ресурсы и питание полувольных бизонов (*Bison bison*) на степном пастбище долины западного Маныча // Зоологический журнал. Т. 95. № 2. С. 234-244.
- Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А. 1956. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. Москва: Гос. изд-во с.-х. лит. 470 с.
- Русанов А.М. 2011. Почва как фактор восстановления растительности естественных пастбищ // Экология. № 1. С. 34-42.
- Систематический список коллекции животных Ростовского-на-Дону зоопарка. 2022 [Электронный ресурс <https://www.zoopark-rostov.ru/index.php/novosti-i-sobytiya/2-uncategorised/200-kollektsiya-zooparka> (дата обращения 14.01.2023)].
- Хазиев Ф.Х. 2018. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. № 1(2). С. 80-92.
- Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья. 990 с.
- Chen J., Shao C., Jiang S., Qu L., Zhao F., Dong G. 2019. Effects of changes in precipitation on energy and water balance in a Eurasian meadow steppe // Ecological processes. Т. 8. № 1. С. 1-15.
- Garcia-Franco N., Martínez-Mena M., Goberna M., Albaladejo J. 2015. Changes in soil aggregation and microbial community structure control carbon sequestration after afforestation of semiarid shrublands // Soil biology and biochemistry. Т. 87. С. 110-121.
- Hoffmann C., Funk R., Li Y., Sommer M. 2008. Effect of grazing on wind driven carbon and nitrogen ratios in the grasslands of Inner Mongolia // Catena. Т. 75. № 2. С. 182-190.
- Kazeev K., Zhadobin A., Gobarova A., Fedorenko A., Kolesnikov S. 2021. Assessment of ecological state of Rostov zoo soil // Eurasian Journal of Soil Science. Т. 10. № 2. С. 87-95.
- Levi E.M., Archer S.R., Throop H.L., Rasmussen C. 2020. Soil-litter mixing promotes decomposition and soil aggregate formation on contrasting geomorphic surfaces in a shrub-invaded Sonoran Desert grassland // Plant and Soil.

Т. 450. № 1. С. 397-415.

- Lu M., Yang M., Yang Y., Wang D., Sheng L.* 2019. Soil carbon and nutrient sequestration linking to soil aggregate in a temperate fen in Northeast China // *Ecological Indicators*. Т. 98. С. 869-878.
- Marinari S., Mancinelli R., Campiglia E., Grego S.* 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy // *Ecological Indicators*. Vol. 6 (4). P. 701-711.
- Menon M., Mawodza T., Rabbani A., Blaud A., Lair G. J., Babaei M., Banwart S.* 2020. Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability // *Geoderma*. Т. 366. P. 114259.
- Parwada C., Van Tol J.* 2019. Effects of litter quality on macroaggregates reformation and soil stability in different soil horizons // *Environment, Development and Sustainability*. Т. 21. No. 3. P. 1321-1339.
- Sarker J.R., Singh B.P., Cowie A.L., Fang Y., Collins D., Badgery W., Dalal R.C.* 2018. Agricultural management practices impacted carbon and nutrient concentrations in soil aggregates, with minimal influence on aggregate stability and total carbon and nutrient stocks in contrasting soils // *Soil and Tillage Research*. Т. 178. P. 209-223.
- Steffens M., Kölbl A., Totsche K.U., Kögel-Knabner I.* 2008. Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (PR China) // *Geoderma*. Т. 143. No. 1-2. P. 63-72.
- Wiesmeier M., Steffens M., Kölbl A., Kögel-Knabner I.* 2009. Degradation and small-scale spatial homogenization of topsoils in intensively-grazed steppes of Northern China // *Soil and Tillage Research*. Т. 104. No. 2. P. 299-310.
- Xiao L., Liu G., Li P., Li Q., Xue S.* 2020. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation during secondary succession of natural grassland on the Loess Plateau, China // *Soil and Tillage Research*. Т. 200. P. 104605.
- Yurkova N.E., Yurkov A.M., Smagin A.V.* 2009. Ecological status of soils in Moscow Zoo // *Eurasian Soil Science*. Т. 42. No. 3. P. 342-348.
- Zhadobin A.V., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I.* 2020. Influence of ameliorants on soil respiration of volleys of the Rostov zoo // *Indian Journal of Ecology*. Т. 47. No. 4. P. 979-983.
- Zhao F.Z., Fan X.D., Ren C.J., Zhang L., Han X.H., Yang G.H., Doughty R.* 2018. Changes of the organic carbon content and stability of soil aggregates affected by soil bacterial community after afforestation // *Catena*. Т. 171. P. 622-631.
- Zhou X., Wang J., Hao Y., Wang Y.* 2010. Intermediate grazing intensities by sheep increase soil bacterial diversities in an Inner Mongolian steppe // *Biology and Fertility of Soils*. Т. 46. No. 8. P. 817-824.

УДК 614.7

**ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ И СЕРЫ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ПОЧВ  
ЗОН ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕРРИКОНА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ  
(СРЕДНЕРУССКАЯ ЛЕСОСТЕПЬ)**

© 2023 г. И.Н. Семенков, А.В. Шарапова, С.А. Леднев, Т.В. Королева

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: semenkov@geogr.msu.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

Нерекультивированные отвалы Подмосковского угольного бассейна представляют многолетний стихийный эксперимент, отражающий трансформацию почв и токсичного техногенного материала под воздействием сернокислых стоков, обогащенных соединениями тяжелых металлов и металлоидов. В Тульской области для анализа трансформации фракционного состава соединений 6 элементов в почвах сернокислых геокомплексов на 11 точках (суммарно – 57 проб) были исследованы гранулометрический состав, величина рН, удельная электропроводимость водной вытяжки, концентрация углерода органических веществ и трех подвижных форм, а также валовое содержание Al, Ca, Fe, Mn и S. Тяжелосуглинистые черноземы, не подверженные воздействию террикона, содержат до 9% углерода органических веществ, имеют околонейтральную среду и невысокую удельную электропроводимость. В них средняя подвижность элементов (в %) уменьшается в ряду: Ca (62) > Mn (35) > Al, Fe (14) > S (3). Среди подвижных соединений Ca преобладают обменные, Al, Fe и Mn – извлекаемые 1n HNO<sub>3</sub> при близких уровнях концентрации трех изученных подвижных форм у S. Среднетяжелосуглинистые токсилитостраты незадернованной поверхности террикона с преимущественно очень кислой средой зачастую имеют сульфатное засоление. В них средняя подвижность элементов уменьшается в ряду: Ca (80) > Fe (36) > S (15) > Al, Mn (3). Среди подвижных соединений Ca, Mn и S преобладают обменные, Al и Fe – извлекаемые 1n HNO<sub>3</sub>. Сернокислые стоки и твердофазное вещество с террикона образуют делювиально-пролювиальные шлейфы, которые погребают высокопродуктивные черноземы. По показателям фракционного состава соединений Al, Ca, Fe, Mg, Mn и S незадернованные почвы шлейфов близки к токсичным субстратам террикона, а задернованные почвы шлейфа приближаются к фоновым черноземам. Относительно материала террикона в перемещенном субстрате из делювиально-пролювиальных шлейфов понижено содержание подвижных соединений и валовых Ca, S. Предположительно за счет влияния растительности в задернованном субстрате значимо повышено содержание подвижных соединений Mn и подвижность Al, а за счет ослабленного поступления веществ с тела террикона понижена подвижность Fe. Поступление сернокислых растворов в гор. АУх черноземов повышает содержание подвижных соединений и валовой S, а также водорастворимых Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> при снижении содержания подвижных соединений и валового Mn.

*Ключевые слова:* объекты накопленного вреда, потенциально токсичные элементы, темноцветные почвы, черноземы, токсичные техногенные поверхностные образования (Technosols), фракционирование, угледобыча, загрязнение почв.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-118-127**

**EDN: WZSRNK**

Уголь – один из главных источников энергии, занимающий ключевую позицию в структуре энергобаланса многих стран мира. В России, обладающей значительными запасами угля и эффективными методами его добычи и обеспечивающей стабильно внутренний и внешний рынок, находится 22 угольных бассейна и 129 отдельных месторождений. Угольная промышленность входит в десятку отраслей, наиболее негативно воздействующих на окружающую среду за счет водопотребления, эмиссии поллютантов в гидросферу и атмосферу, изъятия территорий из

землепользования и ухудшения качества земель при размещении отходов производства в породных отвалах. В 2020 г. Правительство РФ утвердило Программу развития угольной промышленности до 2035 г., предусматривающую оптимизацию отрасли, в том числе снижение негативного воздействия на окружающую среду. Документ декларирует прекращение неэффективной добычи низкокачественного сырья в Подмосковном угольном бассейне (ПУБ), но не освещает необходимость природоохранных мероприятий для минимизации накопленного вреда, оказанного за многолетнее и бесконтрольное существование отвалов угольных шахт.

В Тульской области отсутствие или незавершенность рекультивации после стихийной остановки угледобычи в ПУБ, высокая плотность населения и распашка заброшенных в 90-х гг. XX в. земель сельхозназначения породила конфликт землепользования за счет негативного влияния пришахтных территорий на близлежащие экосистемы, включая агроценозы. Фактически нерекультивированные отвалы ПУБ представляют стихийный эксперимент продолжительностью десятки лет в направлении и интенсивности деградации экосистем, появлении новых почв и эффективных мероприятиях по реабилитации нарушенных земель (Леднев и др., 2020; Шарапова и др., 2020). Сходные экологические проблемы наблюдаются и в других регионах мира, где ведется добыча сернокислых углей (Semenkov et al., 2022).

Отвалы угольных шахт (abandoned coal mine spoil heaps) ПУБ сложены токсичным материалом, содержащим повышенные уровни Fe, Mn и S в форме пирита, марказита и других минералов, при окислении которых формируется  $H_2SO_4$ , активно трансформирующая минеральную матрицу почвы, переводя в раствор многие вещества, включая соединения Al, Ca, Mg. Под действием талых и дождевых вод в подчиненные ландшафты (включая в отдельных случаях и пахотные земли) поступают сернокислые токсичные стоки. В результате меняется существовавшее в природе равновесие, и формируются особые сернокислые геокомплексы с потенциально кислыми сульфатными почвами, которые также встречаются в местах выхода вод, дренирующих сульфидные месторождения (Trifi et al., 2018), ландшафтах парогидротерм и фумарол (Semenkov et al., 2021). При этом периферия образующихся пролювиальных и делювиальных шлейфов активно зарастает растительностью – березовыми лесами и злаковыми лугами (Леднев и др., 2020), что сопровождается реградацией загрязненных почв (Семина, Андроханов, 2021; Krupskaya et al., 2020) – хемоземов.

Цель исследований – сравнительный анализ фракционного состава соединений Al, Ca, Fe, Mg, Mn и S в кислых сульфатных почвах пролювиально-делювиальных шлейфов и террикона угольной шахты, а также в черноземах.

### Объекты и методы

По итогам рекогносцировочных исследований на площади 10 тыс. га в пределах Киреевского и Узловского районов Тульской области, где находилось 13 угольных шахт, в 2 км к западу от поселка Ильинка выбран террикон (отвал конической формы высотой 25 м и диаметром 240 м с склонами крутизной около 30°, расчлененными промоинами) как модельный объект исследования его техногенных поверхностных образований и сопряженных с ними почв делювиально-пролювиальных шлейфов, контактирующих с высокоплодородными черноземами, и глубоких (до 2-3 м) просадок грунта над заброшенными шахтами (Юдина и др., 2022). В ходе полевых работ исследованы хемоземы, или токсилитостраты на практически незадернованной поверхности террикона, токсилитостратоземы на незадернованном подножье террикона, токсилитостратоземы на погребенных черноземах химически трансформированных под злаковыми лугами (доминанты – *Calamagrostis epigeios*<sup>1</sup>, *Poa* spp.) и березняками (*Betula pendula*), агрочерноземы токсилитостратифицированные в просадке под культурфитоценозом и черноземы под залежным мезофитным (доминирует *Fragaria viridis*) лугом на междуречье и мезогифитным лугом (доминируют *Phleum pratense*, *Geranium pratense*) днища балки (Леднев и др., 2020; Шарапова и др., 2020; Юдина и др., 2022).

Всего на 11 точках отобрано и проанализировано 57 проб. Из двух токсилитостратов отобрали по 3 образца из верхней метровой толщи (глубины 0-10, 20-20 и 90-100 см). Токсилитостратоземы опробовали на всю мощность перемещенного субстрата (с глубины 0-10 см, середины и нижних 10 см наноса) с захватом погребенного гумусового горизонта (по 1-2 пробы в зависимости от

<sup>1</sup> Латинские названия растений приводятся по работе С.К. Черепанова (1995).

мощности). В черноземах опробовали только темно-гумусовый горизонт АU из слоя 0-10 см, середины и низа горизонта. Опробование верхних 0-10 см выполнено для характеристики слоя, которому соответствует максимальная биологическая активность микроорганизмов и степень преобразования техногенного субстрата на объектах сходного возраста Канско-Ачинского угольного бассейна (Трефилова и др., 2014).

Содержание  $C_{орг.}$  определяли бихроматным методом по И.В. Тюрину (Кречетов, Дианова, 2009) с титриметрическим окончанием с фенилантралиновой кислотой, гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии на приборе «Analizer 22» фирмы «Fritsch» (Германия; Пансю, Готеру, 2014). Величину рН измеряли потенциометрически в суспензии при постоянном помешивании (соотношение почва:раствор – 1: 2.5) на приборе «Эксперт-рН» (Россия), удельную электропроводимость (ЕС) водной вытяжки – кондуктометрически (1: 5 на приборе «SevenEasy S30» Mettler Toledo, США), содержание  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  (1: 5) методом ионной хроматографии с кондуктометрическим детектированием (хроматограф «Стайер-М», Россия; Кречетов, Дианова, 2009; Пансю, Готеру, 2014). Потери при прокаливании определены методом сухого сжигания при температуре 900°C (Кречетов, Дианова, 2009).

Валовой состав почв исследован с помощью рентген-флуоресцентного анализатора «Axios» фирмы «PANalytical» (Нидерланды) с использованием стандартных образцов российских почв. Непрочно связанные соединения параллельно извлекали из почв ацетатно-аммонийным буфером (ААБ), ААБ с 1% ЭДТА (этилендиаминтетрауксусной кислотой) и 1n  $HNO_3$  (соотношение почва:раствор 1:10, время экстракции – 18 ч для всех вытяжек) соответственно по методике Т.М. Минкиной с соавторами (2008). Концентрацию элементов в вытяжках определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ФР.1.31.2017.28120 НСАМ № 520-АЭС/МС). Все эти экстрагенты не являются строго селективными, но позволяют получить информацию о потенциально доступном запасе элементов-загрязнителей. Кроме того, воздействие 1n  $HNO_3$  можно рассматривать как аналог поступления сернокислых вод в фоновые черноземы (Semenkov et al., 2022). Фракция F1, экстрагируемая ААБ, включает обменные соединения. Фракция F2 соответствует соединениям элементам, находившимся в почвах в форме непрочно удерживаемых органических комплексов. Фракция F3 характеризует элементы, входящие в состав различных твердофазных соединений и удерживаемые почвенными компонентами различными связями (Минкина и др., 2008). Прочно связанные соединения (остаточная фракция – F4) рассчитаны по разнице между валовым содержанием (F5) и суммарным содержанием трех подвижных форм соединений. Подвижность элементов выражена в % как доля непрочно связанных соединений относительно валового содержания.

В техногенном материале и гумусовом горизонте почв элементный состав и свойства почв характеризовали, рассчитывая среднее, стандартное отклонение и коэффициенты корреляции Спирмена, выполняя непараметрический тест Манна-Уитни с использованием в качестве порогового уровня значимости –  $p = 0.05$ . В статье приведены результаты по 8 выборкам<sup>2</sup> проб, сформированным в соответствии с типом материала и местом его опробования. I – вскрышные породы террикона ( $n = 6$ ); материал, перемещенный с его поверхности и перекрывший природные черноземы: II – гор. RX,  $n = 6$  и [A],  $n = 1-3$  соответственно; III – гор. RX,  $n = 12-14$  и [A],  $n = 5-14$ ; IV – гор. RX,  $n = 1$  и [A],  $n = 2-4$ ; V – гор. AU фоновых черноземов,  $n = 4-9$ . Величина рН, гранулометрический состав, ЕС и  $C_{орг.}$  определены во всех отобранных пробах, элементный состав почв и содержание подвижных форм исследованы в 34 пробах.

### Результаты и обсуждение

*Характеристика изученных почв. Фоновые тяжелосуглинистые черноземы содержат до 9%  $C_{орг.}$ , имеют околонейтральную реакцию среды и невысокую ЕС (табл.). Изученные почвы относительно черноземов Среднерусской возвышенности (Шопина и др., 2020) выделяются лишь повышенным содержанием Ca и Mg, что, вероятно, является локальной особенностью.*

<sup>2</sup> Приведенная нумерация выборок проб сохраняется в иллюстративном материале настоящей статьи.

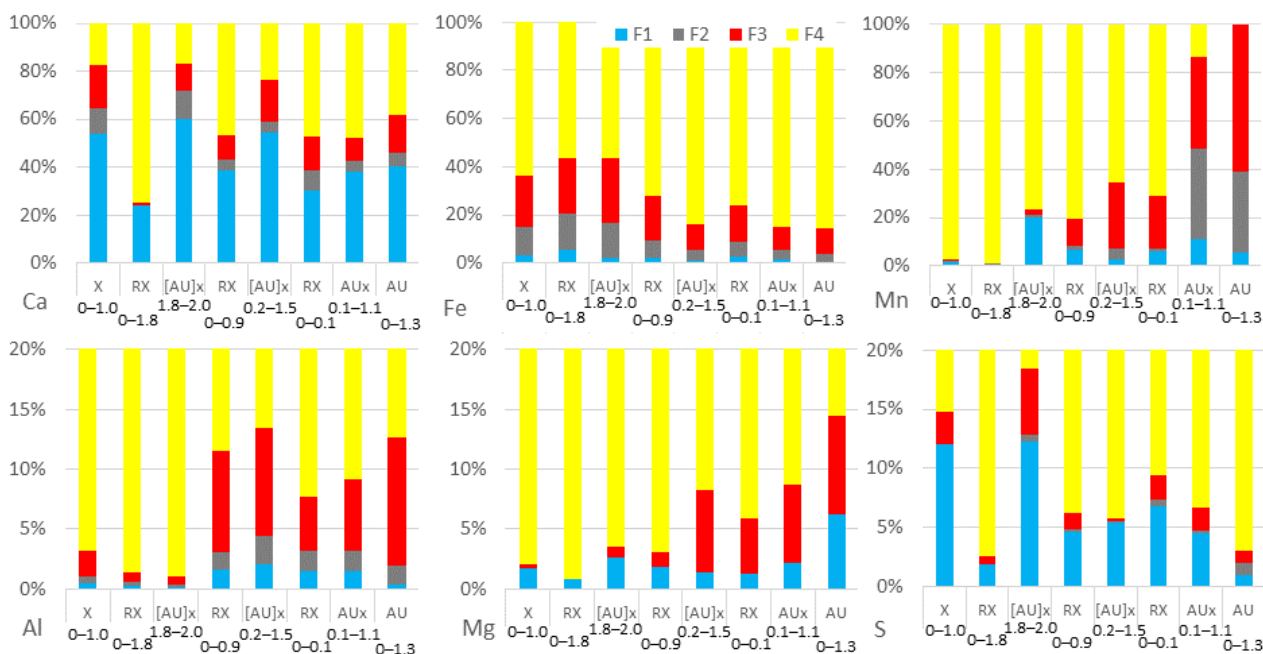
Таблица. Медианные значения показателей изученных почв.

Показатели		Материал вскрышных пород				Гумусовый горизонт			
		I*	II	III	IV	II	III	IV	V
Грануло- метрические фракции (мм), %	500-250	< 0.01	5.1	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
	250-50	4.6	39	27	< 0.01	1.3	0.5	< 0.01	< 0.01
	50-10	52	25	39	41	47	44	37	42
	10-5	14	8.7	11	18	14	16	18	17
	5-1	25	15	19	32	29	31	35	33
	< 1	7.5	4.5	4.7	8.8	7.6	7.8	9.1	8.3
	< 10	46	28	34	59	51	55	63	58
ППП**, %		18	16	17	24	19	11	17	10
С <sub>орг.</sub> , %		8.8	8.0	7.9	10.2	3.5	3.7	6.1	3.2
ЕС, мкС/см		1639	311	248	523	506	143	217	21
рН		3.8	3.8	4.9	4.4	4.1	5.7	4.7	6.5
Al1***, г/кг		0.21	0.15	0.69	0.97	0.06	0.86	0.83	0.13
Al2, г/кг		0.27	0.21	0.65	1.14	0.13	0.94	1.01	0.55
Al3, г/кг		0.97	0.40	3.73	3.03	0.44	3.71	3.39	3.76
Al5, %		4.5	5.7	4.4	6.7	5.7	4.1	5.7	3.5
Ca0, мг/100г		105	21	17	34	48	12	14	2.9
Ca1, г/кг		2.64	0.19	0.62	0.57	3.30	3.75	1.67	3.60
Ca2, г/кг		0.53	< 0.01	0.07	0.16	0.66	0.32	0.20	0.50
Ca3, г/кг		0.88	0.01	0.16	0.27	0.61	1.20	0.43	1.42
Ca5, %		0.49	0.08	0.16	0.19	0.55	0.69	0.44	0.89
Fe1, г/кг		0.46	0.74	0.33	0.69	0.21	0.20	0.38	0.08
Fe2, г/кг		1.6	1.9	1.0	1.7	1.6	1.1	1.1	0.91
Fe3, г/кг		3.0	3.0	2.6	4.0	3.0	2.5	2.7	2.7
Fe5, %		1.4	1.3	1.4	2.7	1.1	2.4	2.8	2.6
Mg0, мг/100г		1.4	0.9	1.0	1.7	1.6	0.8	0.9	0.3
Mg1, г/кг		0.022	0.013	0.024	0.034	0.049	0.067	0.089	0.348
Mg3, г/кг		0.004	0.000	0.016	0.127	0.017	0.346	0.275	0.457
Mg5, %		0.12	0.16	0.13	0.27	0.19	0.50	0.42	0.56
Mgm, %		2.3	1.2	2.9	5.9	3.6	7.6	7.8	13.4
Mn1, мг/кг		0.5	0.24	4.53	8.9	17.1	11	77	41
Mn2, мг/кг		0.21	0.14	1.2	1.9	0.9	18	255	263
Mn3, мг/кг		0.25	< 0.01	8.1	31.5	2.0	113	257	474
Mn5, мг/кг		35	43	70	147	85	414	682	740
S0, г/кг		14.8	2.0	1.6	3.6	3.7	0.95	1.19	0.06
S1, г/кг		2.53	0.19	0.64	0.75	1.71	0.28	0.25	0.01
S2, г/кг		0	< 0.01	0.03	0.06	0.08	0.01	0.01	0.01
S3, г/кг		0.57	0.07	0.20	0.22	0.79	0.01	0.11	0.01
S5, %		2.1	1.0	1.4	1.1	1.4	0.52	0.55	0.10
n		6	3-6	12-14	1	1-3	5-14	2-4	4-9

**Примечания к таблице:** I\* – токсилитострат (хемозем) незадернованный склонов террикона, II – токсистратозем незадернованный делювиальных шлейфов, III – токсистратозем задернованный делювиально-пролювиальных шлейфов, IV – чернозем токсистратифицированный, V – чернозем (фоновый) под лугом. ППП\*\* – потери при прокаливании. Формы: \*\*\*0 – водорастворимая, 1 – F1, 2 – F2, 3 – F3, 5 – валовое содержание. Соединения Mg2 не обнаружены. Содержание фракции – 1000-500 мм < 0.01%.

*Почвы сернокислых геокомплексов.* Средне-тяжелосуглинистые токсилитостраты поверхности террикона содержат различное количество  $C_{орг.}$  (до 5% на прогоревших участках и до 23% на негоревших), имеют преимущественно очень кислую среду (3.7-3.9) и сульфатное засоление, меняющиеся на слабокислую среду и пониженную ЕС на прогоревших участках. В перемещенном техногенном субстрате токсистратоземов делювиально-пролювиальных шлейфов повышено содержание среднего и мелкого песка и понижено – пылеватых фракций и ила, а также ЕС. На задернованной поверхности существенно выше величина рН ( $p = 0.012$ ) и ниже содержание  $SO_4^{2-}$  ( $p = 0.0002$ ), что создает более благоприятную среду для поселения растительности. В погребенном гумусовом горизонте черноземов шлейфа и просадки относительно фоновых почв значимо выше ЕС, содержание водорастворимого  $Ca^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$  и ниже величина рН.

*Алюминий.* Вскрышные породы террикона содержат в 1.5 раза больше Al ( $p = 0.01$ ), чем гор. AU фоновых черноземов. В гор. RX задернованного делювиального шлейфа относительно вскрышных пород тела террикона значимо выше содержание Al в F3 ( $p = 0.03$ ) и его подвижность (0.04). В гор. RX незадернованной поверхности шлейфа эти показатели слабее отличаются от материала тела террикона ( $p = 0.095$  и  $0.071$  соответственно). В гор. AU погребенных черноземов полученные данные не позволили выявить пространственную дифференциацию соединений Al за счет высокой вариабельности: в большинстве случаев коэффициент вариации  $Cv = 40-150\%$  при значениях в фоновых почвах 5-10%, что индицирует высокую неоднородность потоков и механизмов фиксации его соединений. Среди соединений Al преобладают прочно сорбированные. Подвижность элемента понижена в незадернованных почвах по сравнению с задернованными (рис.).



**Рис.** Фракционный состав соединений металлов и S в горизонтах изученных почв Среднерусской возвышенности (глубины опробования представлены в метрах). *Условные обозначения:* F1 – обменные соединения, F2 – непрочные удерживаемые органические комплексы, F3 – иные подвижные соединения, удерживаемые почвенными компонентами различными связями, F4 – остаточная фракция. Горизонты почв и глубины их опробования в м: X<sub>0-1.0</sub> – токсичный материал токсилитострата (хемозема) незадернованных склонов террикона; RX<sub>0-1.8</sub> – токсистратифицированный и [AU]x<sub>1.8-2.0</sub> – погребенный темногумусовый горизонты токсистратозема незадернованного делювиального шлейфа; RX<sub>0-0.9</sub> – токсистратифицированный и [AU]x<sub>0.2-1.5</sub> – погребенный темногумусовый горизонты токсистратозема задернованного делювиально-пролювиального шлейфа; RX<sub>0-0.1</sub> – токсистратифицированный и AUx<sub>0.1-1.1</sub> – темногумусовый горизонты чернозема токсистратифицированного периферии шлейфа террикона; AU<sub>0-1.3</sub> – темногумусовый горизонт фонового чернозема токсистратифицированного под лугом.



*Кальций.* Вскрышные породы террикона содержат в 2.0 и 1.5 раза меньше валового и обменного Ca, но в 37.2 раза больше водорастворимого ( $p = 0.01, 0.04$  и  $0.0004$  соответственно), чем гор. АУ фоновых черноземов. В субстрате ряда почв «токсилитостраты незадернованные – токсистратоземы незадернованные – токсистратоземы задернованные» понижается содержание водорастворимого  $Ca^{2+}$  ( $p = 0.051-0.065$ ). В сильноокислой среде за счет активного выщелачивания из крупных обломков первичных минералов во вскрышной породе содержится много водорастворимого  $Ca^{2+}$ . Относительно материала с тела террикона содержание F1, F2, F3 ( $p < 0.05$ ) и валового Ca ( $p = 0.020-0.071$ ) меньше в незадернованных токсистратоземах, чем в задернованных, что может отражать нарушение естественного баланса, необходимого для произрастания растений.

Погребенный токсичным субстратом делювиального шлейфа гор. АУ чернозема относительно фоновых почв отличается повышенным содержанием водорастворимого  $Ca^{2+}$  как на незадернованной и задернованной поверхности шлейфа, так и в просадке, сопряженной с терриконом ( $p < 0.036$ ). По остальным подвижным формам Ca различия не значимы, что отражает относительно слабое преобразование погребенного горизонта по этому показателю.

Во всех обследованных почвах среди подвижных соединений Ca преобладает F1. Доля F3, как правило, больше, чем F2. При этом соотношение подвижных соединений слабо отличается в токсичном субстрате и гор. АУ рассматриваемых почв. Но в последнем подвижность незначительно выше ( $p = 0.08-0.91$ ; рис.).

*Железо.* Вскрышные породы тела террикона по содержанию Fe значимо не отличаются от горизонта АУ фоновых черноземов за счет высокой вариабельности содержания металла в слабо сортированном техногенном материале. По остальным формам Fe также не удалось выявить дифференциации. В большинстве случаев среди соединений Fe преобладают прочно связанные (рис.). Причем в незадернованных почвах его подвижность выше, чем в задернованных за счет соединений фракций F2 и F3, что, вероятно, связано с извлечением в раствор сульфидов.

*Магний.* Вскрышные породы террикона относительно гор. АУ фоновых черноземов отличаются пониженным валовым содержанием Mg и F1 и F3, а также долей подвижных соединений. Аналогичные особенности характерны и для пар горизонтов RX-[A], опробованных на шлейфе и в просадке. Однако содержание водорастворимого  $Mg^{2+}$  значимо выше в гор. [A] почв шлейфов и просадки относительно фоновых черноземов ( $p < 0.003$ ). По мере удаления от террикона в почвах увеличивается подвижность Mg преимущественно за счет увеличения доли F3 (рис.). Всё это позволяет рассматривать фракционный состав соединений Mg как надежный индикатор поступления сернокислых вод.

*Марганец.* Вскрышные породы террикона содержат на порядок меньше валового Mn, чем гор. АУ фоновых черноземов ( $p = 0.01$ ). Значимые различия характерны и в отношении трех изученных подвижных форм и подвижности элемента ( $p < 0.01$ ), что наряду с высокой кислотностью и повышенным содержанием токсичных элементов может быть одним из факторов, сдерживающим заселение техногенного материала растениями, так как Mn является для растений необходимым микроэлементом.

Субстрат незадернованных токсистратоземов по содержанию F1 и F2 соединений Mn значимо не отличается от материала с тела террикона, что, вероятно, объясняется их равновесным содержанием в виду активного перемещения из почв, расположенных на более высоких гипсометрических отметках. Лишь F3 соединений Mn меньше ( $p = 0.024$ ), что может указывать на его вынос за счет воздействия сернокислых растворов. В наносном же субстрате задернованных токсилитостратов выше содержание трех изученных подвижных форм и подвижность Mn ( $p < 0.02$ ), что, возможно, является результатом накопления этих соединений на биогеохимическом барьере. Кроме того, наряду с нормализацией кислотности и вероятным снижением концентрации токсичных элементов это может указывать на достижение минимального уровня, необходимого для роста и развития растительности.

В погребенном горизонте черноземов относительно фоновых почв за счет влияния сернокислых стоков понижено содержание всех трех подвижных форм, валового содержания и подвижности Mn (рис.). Однако значимы различия только в отношении соединений фракции F3 и валового содержания Mn в гор. [AU]x задернованных токсистратоземов. При этом чем интенсивнее воздействие, тем сильнее отличаются медианные значения от фоновых показателей.

В ряду изученных почв «токсистратоземы незадернованные – токсистратоземы задернованные – черноземы токсистратифицированные – черноземы фоновые» разительно меняется соотношение соединений Mn в горизонте [AU]x/AU (рис.), что отражает высокую индикационную роль для оценки степени трансформации почв, подверженных воздействию сернокислых вод.

*Сера.* Вскрышные породы террикона содержат в разы больше валовой S и в десятки – сотни раз ее соединений, экстрагируемых из почвы водой, ААБ и 1н HNO<sub>3</sub> ( $p < 0.01$ ), чем гор. AU фоновых черноземов. При этом содержание соединений фракции F2, напротив, в 14 раз больше в черноземе ( $p = 0.0095$ ).

В перемещенном техногенном субстрате от участков, расположенных ближе к террикону (незадернованные токсистратоземы), к удаленным (здернованные токсистратоземы) снижается содержание водорастворимых соединений S. При этом значимые различия относительно материала с тела террикона выявлены только для задернованных токсистратоземов ( $p = 0.0002$ ). В приносном субстрате почв делювиально-пролювиальных шлейфов содержание S, экстрагируемой ААБ и 1н HNO<sub>3</sub>, также ниже ( $p < 0.025$ ), чем в токсилитостратах даже при повышенной вариабельности показателя. Содержание же соединений S фракции F2 выше в почвах шлейфа, чем на терриконе. Однако различия значимы ( $p = 0.013$ ) только для задернованных токсистратоземов, что, вероятно, связано с высокой вариабельностью значений ( $C_v = 100-250\%$ ) и малым объемом отдельных рассматриваемых выборок. Для валовой S и ее подвижности свойственны аналогичные особенности только с противоположным знаком – пониженные содержания в почвах шлейфов – даже с меньшим уровнем вариабельности ( $C_v = 30-45\%$  и  $20-100\%$  соответственно).

Гор. AU погребенных черноземов испытывает мощное поступление водорастворимых соединений S: ее содержание в 10-100 раз больше, чем в фоновых черноземах ( $p < 0.011$ ). Причем по мере удаления от террикона содержание этих соединений снижается. Для S, извлекаемой ААБ, различия такие же существенные, но значимые лишь для задернованных токсистратоземов за счет более высокой вариабельности, чем у водорастворимых соединений S ( $C_v = 50-120\%$  и  $3-15\%$  соответственно). В отношении валовой S выявлены те же особенности, хотя при меньшей вариабельности ( $C_v = 20-90\%$ ) различия значимы также только для гор. AU фонового чернозема и находящегося под задернованным токсистратоземом. По F2 и F3 соединениям S наблюдаются лишь сходные тенденции из-за ограниченного размера выборки и высокой вариабельности ( $C_v = 40-220\%$ ).

Так же, как и у Al, среди соединений S преобладают F4, а доля подвижных соединений колеблется в пределах 2-20%. Причем во всех рассмотренных почвах среди подвижных соединений высок вклад обменных и водорастворимых соединений (рис.). По соотношению изученных соединений S не удалось выявить ярких особенностей, связанных с источником поступления элемента.

Полученные результаты по фракционному составу соединений исследованных химических элементов в фоновых черноземах достаточно хорошо совпадают с имеющимися в литературе данными (Шарапова и др., 2020; Semenov et al., 2019; Semenov, Koroleva, 2019), что отражает представительность выбранных фоновых черноземов в качестве эталона сравнения. Для Mn получены сопоставимые результаты с данными по черноземам Плавского плато (Шарапова и др., 2020), Зауралья (Semenov et al., 2019; Semenov, Koroleva, 2019), Каменной степи (Шарапова и др., 2020) и юга Западной Сибири (Трефилова и др., 2014). По данным Д.И. Щеглова с соавторами (2013), в черноземах Центрально-Черноземных областей доля фракции F3 Mn составляет лишь 10-20% от валового. Аналогичные низкие значения для подвижных форм Mn отмечены и в черноземах территорий, фоновых по отношению к Новочеркасской ГРЭС (Минкина и др., 2013, 2018).

Выявленная подвижность Fe совпадает с данными по черноземам Плавского плато (Шарапова и др., 2020) и почвам юга Западной Сибири (Сысо, Сиромля, 2018). В исследованных черноземах подвижность и содержание всех трех подвижных форм выше, чем ранее отмечали для почв небольшого балочного водосбора на Плавском плато (Семеников и др., 2015) и в Зауралье (Semenov et al., 2019; Semenov, Koroleva, 2019).

В перемещенном с террикона субстрате за счет воздействия сернокислых стоков обменный Ca вытесняется из почвенного поглощающего комплекса и поступает в раствор. Этот же процесс в нижележащем гор. [AU]x черноземах шлейфа и просадки подтверждает повышение ЕС, содержание водорастворимых Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и подкисление относительно фоновых почв, что индицируют

гипсовые новообразования, отмечавшиеся в почвах периферийной зоны воздействия терриконов угольных шахт ПУБ (Солнцева и др., 1991; Krechetov et al., 2019). Повышенное содержание наиболее миграционно активных (водорастворимых) соединений в почвах, примыкающих к отвалам, типично для молодых природно-техногенных объектов (Никифорова, Солнцева, 1986). В дальнейшем за счет коренного преобразования состава техногенных пород и превышения буферной емкости почв зон воздействия (Жарикова, Костенков, 2014) контрастным становится распределение и более трудно мигрирующих веществ.

В гор. АУ фоновых и слабо трансформированных черноземов близко содержание комплексных и специфически сорбированных соединений Мп, а подвижность превышает 80%. В материале тела террикона и токсичном субстрате незадернованных поверхностей делювиального шлейфа суммарная доля подвижных соединений Мп составляет всего 2-4%. В субстрате задернованной части шлейфа и гор. [АУ]х подвижность колеблется в пределах 20-40%, повышается содержание специфически сорбированных соединений Мп при доле обменных соединений, близкой к фоновым черноземам (рис.). Таким образом, подвижные соединения Мп и его подвижность можно использовать для оценки степени трансформации черноземов в результате воздействия сернокислых вод.

### Заключение

По фракционному составу подвижных соединений Al, Ca, Fe, Mg, Mn и S изученные токсистратоземы делювиально-пролювиальных шлейфов образуют две группы: задернованные и незадернованные. Первые почвы близки к незадернованным токсилитостратам склонов террикона, а задернованные токсистратоземы по соотношению форм элементов (особенно Al, Fe и S) приближаются к фоновым почвам.

Перемещение вскрышных пород с тела терриконов ПУБ сопровождается снижением содержания четырех изученных подвижных форм и валового Ca, а также извлекаемой водой, ААБ, 1n HNO<sub>3</sub> и валовой S. Относительно незадернованного материала в перемещенном с террикона техногенном субстрате, на котором произрастает растительность, выше содержание подвижных (обменных, комплексных и специфически сорбированных) соединений Мп и соединений S, извлекаемых ААБ с 1% ЭДТА, а также ниже подвижность Fe и выше – Al.

Поступление сернокислых растворов в гор. АУ чернозема увеличивает содержание четырех изученных подвижных форм S, ее подвижности и валового содержания, водорастворимых Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> и снижает подвижность, содержание обменных, комплексных и специфически сорбированных соединений и валового Мп.

Контрастность изменения содержания подвижных форм изученных элементов и соответственно их индикационная роль при оценке степени трансформации черноземов под действием сернокислых вод с терриконов ПУБ снижается в ряду: Mg, Mn, Ca > S > Al > Fe.

*Благодарности.* Авторы благодарны П.П. Кречетову за обсуждение промежуточных результатов исследования, Б.А. Ибрагимовой за помощь в выполнении количественного химического анализа, Е.С. Старчиковой и Н.А. Юдиной за подготовку проб и приготовление водной вытяжки, Л.В. Добрыдневой (МГУ) за хроматографический анализ водной вытяжки, А.И. Якушеву (ИГЕМ РАН) за валовой анализ, В.К. Карандашеву (ИПТМ РАН) за элементный анализ вытяжек. При подборе объектов исследования использованы материалы, предоставленные Центром коллективного пользования «Геопортал» (МГУ им. М.В. Ломоносова).

*Финансирование.* Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 20-35-70066 (полевые и химико-аналитические работы) и поддержано Междисциплинарной научно-образовательной школой Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» (интерпретация результатов).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жарикова Е.А., Костенков Н.М. 2014. Особенности физико-химического и калийного состояния почв, формирующихся на породах угольных отвалов // Почвоведение. № 1. С. 120-128.

Кречетов П.П., Дианова Т.М. 2009. Химия почв. Аналитические методы исследования. М.: Географический факультет МГУ. 148 с.

Леднев С.А., Шарапова А.В., Семенов И.Н., Королева Т.В. 2020. Растительные сукцессии на отвалах

угольных шахт в лесостепи Тульской области // Известия Российской академии наук. Серия географическая. Т. 84. № 2. С. 239-245.

*Лиханова И.А., Кузнецова Е.Г., Лантева Е.М., Денева С.В., Макеев Б.А.* 2021. Почвообразование на карьерах после проведения лесной рекультивации в среднетаежной подзоне на Европейском Северо-Востоке России // Почвоведение. № 4. С. 502-520.

*Минкина Т.М., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А., Назаренко О.Г., Максимов А.Ю., Замулина И.В., Бурачевская М.В., Сушкова С.Н.* 2018. Аккумуляция тяжелых металлов разнотравной степной растительностью по данным многолетнего мониторинга // Аридные экосистемы. Т. 24. № 3 (76). С. 43-55. [*Minkina T.M., Mandzhiyeva, S.S. Chaplygin V.A., Nazarenko O.G., Maksimov A.Yu., Zamulina I.V., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N.* 2018. Accumulation of Heavy Metals by Forb Steppe Vegetation According to Long-Term Monitoring Data // *Arid Ecosystems*. Vol. 8. No. 3. P. 190-202.].

*Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Манджиева С.С., Назаренко О.Г., Бурачевская М.В., Антоненко Е.М.* 2013. Фракционно-групповой состав соединений Mn, Cr, Ni и Cd в почвах техногенных ландшафтов (район Новочеркасской ГРЭС) // Почвоведение. № 4. С. 414-425.

*Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г., Крыщенко В.С., Манджиева С.С.* 2008. Формы соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны // Почвоведение. № 7. С. 810-818.

*Никифорова Е.М., Солнцева Н.П.* 1986. Техногенные потоки серы в гумидных ландшафтах районов угледобычи // Вестник Московского университета. Серия 5. География. № 3. С. 52-59.

*Пансю М., Готеру Ж.* 2014. Анализ почвы. Справочник. Минералогические, органические и неорганические методы анализа. СПб.: ЦОП «Профессия». 800 с.

*Семенков И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В.* 2015. Радиальная геохимическая структура почв лесостепных суглинистых катен балочного водосбора в центре Среднерусской возвышенности // Вестник Московского университета. Серия 5. География. № 5. С. 42-53.

*Семина И.С., Андроханов В.А.* 2021. Почвенно-экологическое обследование участков, рекультивированных отходами углеобогащения, на примере Кемеровской области Кузбасса // Уголь. № 7. С. 57-62.

*Солнцева Н.П., Рубилина Н.Е., Герасимова М.И., Алистратов С.В.* 1991. Преобразование морфологии выщелоченных черноземов в районах добычи угля // Почвоведение. № 11. С. 17-29.

*Сысо А.И., Сиромля Т.И.* 2018. Химические элементы и их соединения в почвах и растениях нативных и антропогенных экосистем Сибири // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах. Материалы III международной школы-семинара молодых исследователей. Тюмень: Тюменский государственный университет. С.137-150.

*Трефилова О.В., Гродницкая И.Д., Ефимов Д.Ю.* 2014. Динамика эколого-функциональных параметров реплантоземов на отвалах угольных разрезов Центральной Сибири // Почвоведение. № 1. С. 109-119.

*Шарапова А.В., Семенков И.Н., Леднев С.А., Карпачевский А.М., Королева Т.В.* 2020. Биохимический потенциал саморазвития посттехногенных горнопромышленных геоконструкций Подмосковского буроугольного бассейна // Уголь. № 10. С. 56-61.

*Шопина О.В., Семенков И.Н., Парамонова Т.А.* 2020. Накопление тяжелых металлов и <sup>137</sup>Cs в растительной продукции, выращиваемой на радиоактивно загрязненных черноземах Тульской области // Экология и промышленность России. Т. 24. № 6. С. 48-53

*Щеглов Д.И., Горбунова Н.С., Семенова Л.А., Хатунцева О.А.* 2013. Микроэлементы в почвах сопряженных ландшафтов Каменной степи различной степени гидроморфизма // Почвоведение. № 3. С. 282-290.

*Юдина Н.А., Семенков И.Н., Шарапова А.В., Леднев С.А., Королева Т.В.* 2022. Пространственная дифференциация свойств поверхностного слоя почв, формирующихся на шахтных отвалах в Подмосковном угольном бассейне (среднерусская лесостепь) // Почвоведение. № 10. С. 1310-1320.

*Черепанов С.К.* 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья. 992 с.

*Krechetov P., Chernitsova O., Sharapova A., Terskaya E.* 2019. Technogenic geochemical evolution of chernozems in the sulfur coal mining areas // *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 19. No. 8. P. 3139-3154.

*Krupskaya L.T., Androkhonov V.A., Belanov I.P.* 2020. Technogenic surface formations within the limits of mining-industrial system of the Dalnegorsky district of the Primorsky krai as the reclamation site // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "EarthScience". P. 032046.

*Opekunova M., Opekunov A., Somov V., Kukushkin S., Papyan E.* 2020. Transformation of metals migration and biogeochemical cycling under the influence of copper mining production (the Southern Urals) // *Catena*. Vol. 189. P. 104512.

*Seменков I.N., Klink G.V., Lebedeva M.P., Krupskaya V.V., Chernov M.S. Dorzhieva O.V., Kazinskiy M.T., Sokolov V.N., Zavadskaya A.V.* 2021. The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula // *Scientific reports*. Vol. 11 P. 11077.

*Seменков I., Krupskaya V., Klink G.* 2019. Data on the concentration of fractions and the total content of chemical

elements in catenae within a small catchment area in the Trans Urals, Russia // *Data in Brief*. Vol. 29. P. 104224.

*Semenkov I.N., Koroleva T.V.* 2019. The spatial distribution of fractions and the total content of 24 chemical elements in soil catenas within a small gully's catchment area in the Trans Urals, Russia // *Applied Geochemistry*. Vol. 106. P.1-6.

*Semenkov I., Sharapova A., Lednev S., Yudina N., Karpachevskiy A., Klink G., Koroleva T.* 2022. Geochemical partitioning of heavy metals and metalloids in the ecosystems of abandoned mine sites: a case study within the Moscow Brown Coal Basin // *Water*. Vol. 14. No. 1. P. 113.

*Trifi M., Dermech M., Abdelkrim C., Azouzi R., Hjiri B.* 2018. Extraction procedures of toxic and mobile heavy metal fraction from complex mineralogical tailings affected by acid mine drainage // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 11. No. 12. P. 1-4.

**ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД  
В УСЛОВИЯХ ЗАСУШЛИВОГО КЛИМАТА**

© 2023 г. А.С. Курбанисмаилова\*, Г.Я. Ахмедов\*\*

*\*Институт геологии ДНЦ РАН*

*Россия, 367010, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, д. 75*

*E-mail: tataeva11187@mail.ru*

*\*\*Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики, филиал ОИВТ РАН*

*Россия, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, просп. И. Шамиля, д. 39а*

*E-mail: ganapi@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.10.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

В статье рассматриваются проблемы нецелесообразного сброса отработанных геотермальных вод на открытый грунт и в наземные водоемы, а также выброса с геотермальной водой попутных горючих газов в открытую атмосферу путем сжигания на факеле. Дается оценка и возможные пути технической реализации предотвращения загрязнения окружающей среды, вызванные при использовании геотермальных вод в аридных регионах. Представлены схематические решения эксплуатации геотермальных систем в режиме без солеотложения в условиях утилизации попутного горючего газа метана. Показано, что ввод углекислого газа в закачиваемую обратно в водоносный горизонт отработанную геотермальную воду обеспечивает долговечность работы скважин закачки.

*Ключевые слова:* геотермальная вода, попутный газ метан, энергетическое оборудование, экология, утилизация газа, углеводороды.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-128-135**

**EDN: ZEBHRJ**

**Объекты и методы исследований**

Россия на своей территории располагает значительными ресурсами геотермальных вод, содержащих попутный горючий газ – метан. По данным на 2015 г., в России разведано 58 месторождений термальных вод с дебитом, превышающим 330 тыс. м<sup>3</sup>/сут. На 18 месторождениях идет промышленная эксплуатация, среди которых месторождение Паратунка на Камчатке, Черкесское и Казьминское в Карачаево-Черкессии и Ставропольском крае, Махачкалинское и Кизлярское в Дагестане, Мостовское и Вознесенское в Краснодарском крае. Однако на сегодняшний день остается проблематичной задача закачки отработанных вод обратно в водоносный горизонт, а также утилизация попутного с геотермальной водой горючего газа, в частности, метана как наиболее распространенного. При этом выброс отработанных вод на открытый грунт и продуктов сгорания метана в открытой атмосфере приводят к загрязнению почвы, открытых водоемов и атмосферы Земли, усиливая процессы аридизации и остепнения.

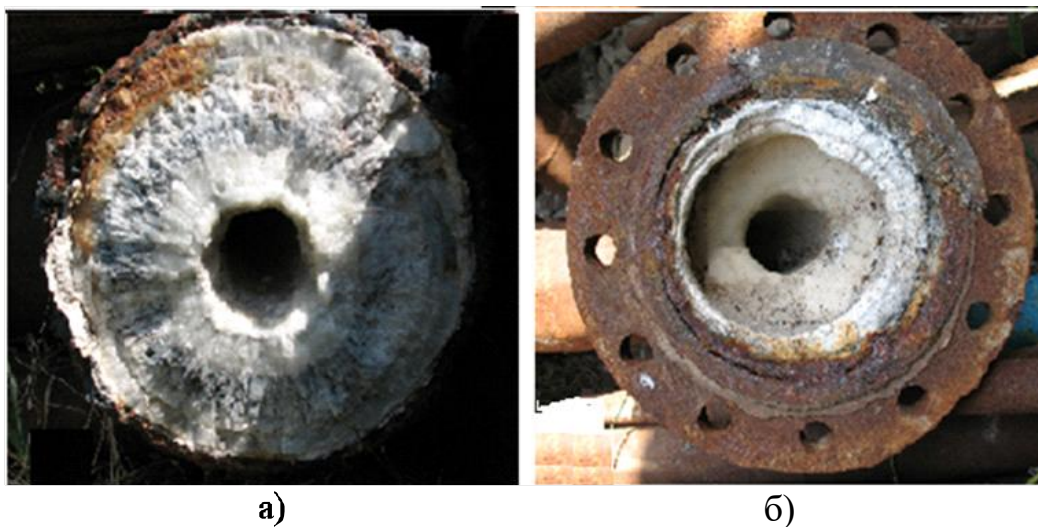
В зависимости от химического и газового состава, а также геологических и геохимических условий формирования принято деление геотермальных вод на сероводородные, сероводородно-углекислые (фумарольные), углекислые, азотно-углекислые, азотные (щелочные), метановые и азотно-метановые (Геотермальное теплоснабжение ..., 1989; Ахмедов, Курбанисмаилова, 2017; Курбанисмаилова и др., 2019; Курбанисмаилова, 2021). Геотермальные воды Кавказа можно отнести к метановым, которые так же широко распространены в крупнейших нефтегазоносных артезианских бассейнах Русской и Сибирской платформ, Западно-Сибирской низменности, Сахалина и ряда других районов России. Они характеризуются минерализацией от 1 до 400-500 г/л. Химический состав этих вод представлен в основном ионами Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, с преимущественным содержанием Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>. В газовом составе преобладают метан CH<sub>4</sub>, углекислый газ CO<sub>2</sub>, азот N<sub>2</sub> и сероводород H<sub>2</sub>S. При использовании таких вод в геотермальных системах засушливых регионов наблюдаются отложения, в основном – малорастворимой соли карбоната

кальция  $\text{CaCO}_3$ .

По степени изученности растворенных газов в водах геотермальных месторождений в нашей стране Предкавказье занимает особое место. Исследования, проводимые на разных скважинах в течение ряда лет, показали, что в составе вод кумского горизонта (глубина залегания – 1300-1400 м с чередованием алевролитов, содержащих газ) преобладает метан (70-90%). Тяжелые углеводороды составляют в среднем 2.6-9.5%. Углекислого газа содержится 3-6%, азота – 1-4%. В зависимости от глубин газовые факторы составляют от 1 до 5  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . На больших глубинах (4000 м и более) предполагается наличие газодляных смесей с высокими газовыми факторами (Акулинчев и др., 1990).

В настоящее время Россия находится в первых рядах по объёму сжигаемого на факеле газа в открытой атмосфере. Однако попытки частичной утилизации попутных горючих газов из метановых вод при газовом факторе менее 2-3  $\text{м}^3/\text{м}^3$  на практике наталкиваются на проблемы неоправданных расходов на их синтез, сушку, сбор и т.д. По этой причине газ, освобожденный из воды из скважин, сжигается на факеле, который в случае большой концентрации углекислого газа, а также азота в общей смеси газов, горит нестабильно.

С другой стороны, попытки извлечения максимального количества попутных газов из геотермальных вод путем снижения общего давления в оборудовании с геотермальной водой в дегазаторах, расширителях, теплообменниках, транспортных трубопроводах приводят к дополнительным затратам, связанным с предотвращением появления твердых отложений (рис. 1) на поверхности этого оборудования. Причиной этих отложений является нарушение химического равновесия между растворенными в воде компонентами химических соединений (Абдуллаев и др., 1986). В связи с этим возникла проблема утилизации попутных с геотермальной водой горючих газов, при которой работа оборудования геотермальных систем могла бы продолжаться.



**Рис. 1.** Внешний вид отложения карбоната кальция в геотермальном оборудовании: а – отложения в трубопроводе подачи геотермальной воды в теплообменник отопления, б – отложения в трубопроводе подачи геотермальной воды в запорную арматуру.

#### Результаты исследования

Анализ состава среднепотенциальных геотермальных вод (температура воды в устье скважины – 45-75°C) в засушливых условиях Восточно-Предкавказского бассейна показывает наличие метана в общей смеси газов более 40-50%. Для характеристики в таблице ниже представлены данные по газовому составу подземных термальных вод из некоторых скважин на месторождениях Восточно-Предкавказского бассейна при глубине залегания от 1000 до 4000 м (Курбанов, 2001). Содержание метана (табл.) в водах большинства приведенных скважин превышает 70%. Содержание азота и углекислого газа в среднем составляют от 3 до 7%. При этом содержание других газов в воде большинства скважин не превышает 0.1%.

Естественно, что использование этих скважин только в целях добычи горючего газа неэффективно по причине их малых концентраций в воде. Однако при добыче геотермальной воды как носителя тепловой энергии извлечение сопутствующих горючих газов с использованием новых технических и технологических решений представляется экономически целесообразным даже при малых концентрациях. Расчеты показывают, что при дебите скважины 2000 м<sup>3</sup>/сут. с газовым фактором 1.5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и наличии 60% метана в общей смеси газов за сутки можно получить около 1000 м<sup>3</sup> метана.

**Таблица.** Газовый состав вод скважин месторождений Восточно-Предкавказского бассейна подземных термальных вод.

Местонахождение и номер скважины	Геологический возраст, интервал перфорации водоносного горизонта, м	Содержание растворенных газов, %			
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> +Ту
<b>Терско-Каспийский артезианский бассейн, Терско-Сулакская зона</b>					
Кизляр-2Т	Апшерон, 1032-1040	–	5.0	0.5	94
Кизляр-6Т	Апшерон, 1040-1049	–	5.1	0.5	93
Юрковская-1ТЮ	Средний миоцен, 2286	3.2	64.1	5.12	28
<b>Терско-Каспийский прогиб, Терско-Сунженская зона</b>					
Заманкул-61	Юра, 4176-4220	–	1.7+рг	1.6	95.4+Ту
Заманкул-61	Юра, 3934-3964	–	3.3+рг	4.7	89.5+Ту
Малгобек-856	Юра, 4000-4015	–	7.0+рг	1.9	82.1+Ту
Аргудан Урухская	Верхний мел, 1115-1418	–	4.4+рг	1.6	93.9+Ту
Заманкул-33	Верхний мел, 2170-2185	–	3.1+рг	4.7	91.3+Ту
Малгобек-Вознесенск-834	Верхний мел, 3064-3088	–	1.4+рг	0.5	93.2+Ту
Хаян-Корт-51	Верхний мел, 3594 -3866	–	0.7+рг	6.0	89.4+Ту
<b>Южно-Дагестанский артезианский бассейн</b>					
Гаша-22	Верхний мел, 3050-3101	–	2.3+рг	2.3	92.88
Исти-су-7	Верхний мел, 3111-3699	–	4.4+рг	2.4	91.97
Берикей, скв. 14	Нижний мел, 913-944	–	1.8+рг	27.3	70.8+Ту
Берикей, скв. 16	Нижний мел, 913-944	–	2.0+рг	10.5	87.4+Ту
сел. Ньюцуг, источник	Нижний мел, 913-944	6.1	91.9+рг	2.0	Нет
Дузлак, скв. 53	Нижний мел, 638-650	–	3.0+рг	2.5	94.4+Ту
оз. Адж-Наур, с. Каякент	Нижний мел, 638-650	нет	13.2+рг	8.5	78.55
<b>Терско-Кумский артезианский бассейн</b>					
Русский Хутор-91	Майкоп	0.38	7.2	19.6	71.50
Русский Хутор-95	Майкоп	1.06	5.35	0.15	93.53
Граничная-2	Нижний мел, 3049-3050	–	4.8	3.1	82.9+Ту
Русский Хутор, центр-20	Нижний мел, 3024-3035	–	5.7	6.9	87.1+Ту
Граничная-1	Нижний мел, 3611-3615	–	4.8	20.7	74.5+Ту
Граничная-1	Нижний мел, 3594-3597	–	4.7	16.5	78.3+Ту
<b>Терско-Каспийский артезианский бассейн, Терско-Сулакская зона</b>					
Кизляр-2Т	Апшерон, 1032-1040	–	5.0	0.5	94
Кизляр-6Т	Апшерон, 1040-1049	–	5.1	0.5	93
Юрковская-1ТЮ	Средний миоцен, 2286	3.2	64.1	5.12	28
<b>Терско-Каспийский прогиб, Терско-Сунженская зона</b>					
Заманкул-61	Юра, 4176-4220	–	1.7+рг	1.6	95.4+Ту



Продолжение таблицы.

Местонахождение и номер скважины	Геологический возраст, интервал перфорации водоносного горизонта, м	Содержание растворенных газов, %			
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> +Ty
<b>Терско-Каспийский прогиб, Терско-Сунженская зона</b>					
Заманкул-61	Юра, 3934-3964	–	3.3+pr	4.7	89.5+Ty
Малгобек-856	Юра, 4000-4015	–	7.0+pr	1.9	82.1+Ty
Аргудан Урухская	Верхний мел, 1115-1418	–	4.4+pr	1.6	93.9+Ty
Заманкул-33	Верхний мел, 2170-2185	–	3.1+pr	4.7	91.3+Ty
Малгобек-Вознесенск-834	Верхний мел, 3064-3088	–	1.4+pr	0.5	93.2+Ty
Хаян-Корт-51	Верхний мел, 3594 -3866	–	0.7+pr	6.0	89.4+Ty
<b>Южно-Дагестанский артезианский бассейн</b>					
Гаша-22	Верхний мел, 3050-3101	–	2.3+pr	2.3	92.88
Исти-су-7	Верхний мел, 3111-3699	–	4.4+pr	2.4	91.97
Берикей, скв. 14	Нижний мел, 913-944	–	1.8+pr	27.3	70.8+Ty
Берикей, скв. 16	Нижний мел, 913-944	–	2.0+pr	10.5	87.4+Ty
сел. Ньюцуг, источник	Нижний мел, 913-944	6.1	91.9+pr	2.0	Нет
Дузлак, скв. 53	Нижний мел, 638-650	–	3.0+pr	2.5	94.4+Ty
оз. Аджи-Наур, с. Каякент	Нижний мел, 638-650	нет	13.2+pr	8.5	78.55
<b>Терско-Кумский артезианский бассейн</b>					
Русский Хутор-91	Майкоп	0.38	7.2	19.6	71.50
Русский Хутор-95	Майкоп	1.06	5.35	0.15	93.53
Граничная-2	Нижний мел, 3049-3050	–	4.8	3.1	82.9+Ty
Русский Хутор, центр-20	Нижний мел, 3024-3035	–	5.7	6.9	87.1+Ty
Граничная-1	Нижний мел, 3611-3615	–	4.8	20.7	74.5+Ty
Граничная-1	Нижний мел, 3594-3597	–	4.7	16.5	78.3+Ty

Для геотермальных скважин Северного Кавказа и Предкавказья общее давление вместе с парами воды  $P_{H_2O}$  создается в основном легкими углеводородами  $P_{угл}$ , углекислым газом  $P_{CO_2}$  и азотом  $P_{N_2}$ :

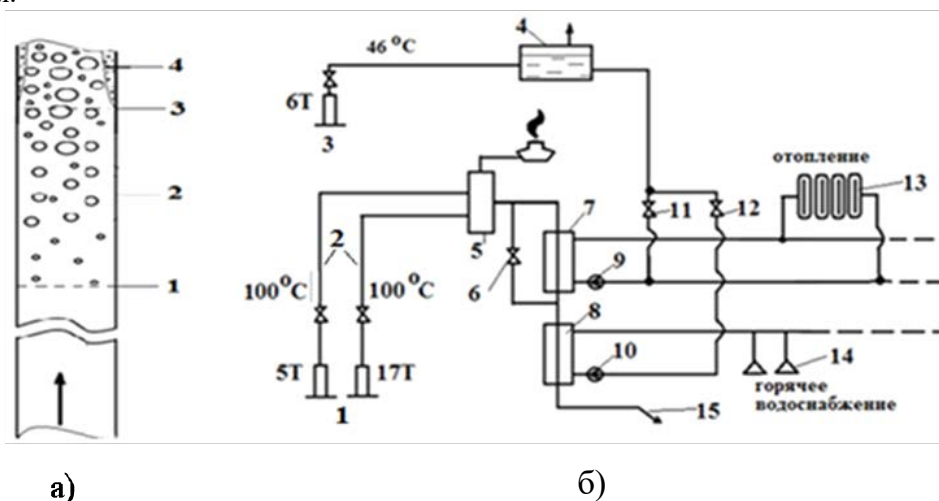
$$P = P_{H_2O} + P_{угл} + P_{CO_2} + P_{N_2} \quad (1).$$

Для вод скважин, приведенных в таблице, с целью упрощения формулы (1) можно опустить выражение для давления азота ввиду его малых значений, а давление легких углеводородов выразить через давление метана, т.к. его в общей массе углеводородов – 90-97% (2):

$$P = P_{H_2O} + P_{CH_4} + P_{CO_2} \quad (2).$$

Для максимального выхода метана из геотермальной воды необходимо снижать общее давление в системе при высокой температуре. Но при этом из-за снижения концентрации  $CO_2$  нарушается карбонатно-кальциевое равновесие в растворе воды. В связи с этим необходимо разрабатывать методику эксплуатации геотермального оборудования в режиме без солеотложения при извлечении горючих газов. При этом необходимо придерживаться равновесных параметров воды (давление и температура) используемых скважин, а также учитывать растворимость газов в воде. Процесс выхода газов начинается еще в скважине. При перемещении воды вдоль эксплуатационной скважины начинается выход в первую очередь газов с наименьшей растворимостью. Для наглядности (рис. 2а) представлена схема начала выхода метана  $CH_4$  (точка 1), углекислого газа  $CO_2$  (точка 2) и, в случае нарушения углекислого равновесия в растворе воды, начало формирования (точка 3) и образования на стенках трубопровода твердых отложений карбоната кальция (поз. 4). На основе проведенных

исследований (рис. 2б) представлена типичная схема эксплуатации геотермального оборудования в наземной части термораспределительных станций (ТРС). Из эксплуатационных скважин 17Т и 5Т (поз. 1) по трубопроводам 2 геотермальная вода поступает через дегазатор 5 в теплообменники отопления 7 и горячего водоснабжения 8 ТРС. При этом отработанная геотермальная вода сбрасывается на линии 15 в канализацию, а освобожденный в дегазаторе 5 газ метан сжигается на факеле в открытой атмосфере. Вода из артезианской скважины 6 через вторичный контур теплообменников 7 и 8 после подогрева поступает к потребителям 13 и 14. В баке 4 осуществляется так же, как и в дегазаторе 5, вывод газа из артезианской воды. Вспомогательная арматура 6, 9-12 используется для регулирования расходов геотермальной и артезианской воды к теплообменникам и потребителям.



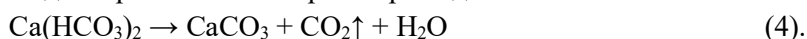
**Рис. 2.** Использование геотермальных вод: а) схема выхода метана и начала возможного формирования твердых отложений  $\text{CaCO}_3$  в эксплуатационной скважине геотермальных вод, б) типичная схема эксплуатации геотермального оборудования в наземной части ТРС.

В настоящее время в Дагестане эксплуатируются скважины геотермальных вод из горизонтов апшерон, караган, чокрак с температурой воды до  $45^\circ\text{C}$ ,  $50-80^\circ\text{C}$  и  $100-105^\circ\text{C}$  соответственно. Общий объем добываемых за сутки вод составляет около 20 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ . Сброс отработанной воды осуществляется (рис. 3) в канал Кизляр – Каспий (выпуски отработанной воды от скважин указаны штрих-пунктирной линией). Проблема закачки отработанных геотермальных вод обратно в водоносный горизонт связана, в первую очередь, с кольматацией пласта из-за наличия взвешенных в воде частиц. С другой стороны, имеет место изменение свойств закачиваемой воды при прохождении через водоносный горизонт. Изменения эти связаны с химическими реакциями при перемене условий нахождения раствора закачиваемой воды в пласте водоносного горизонта.

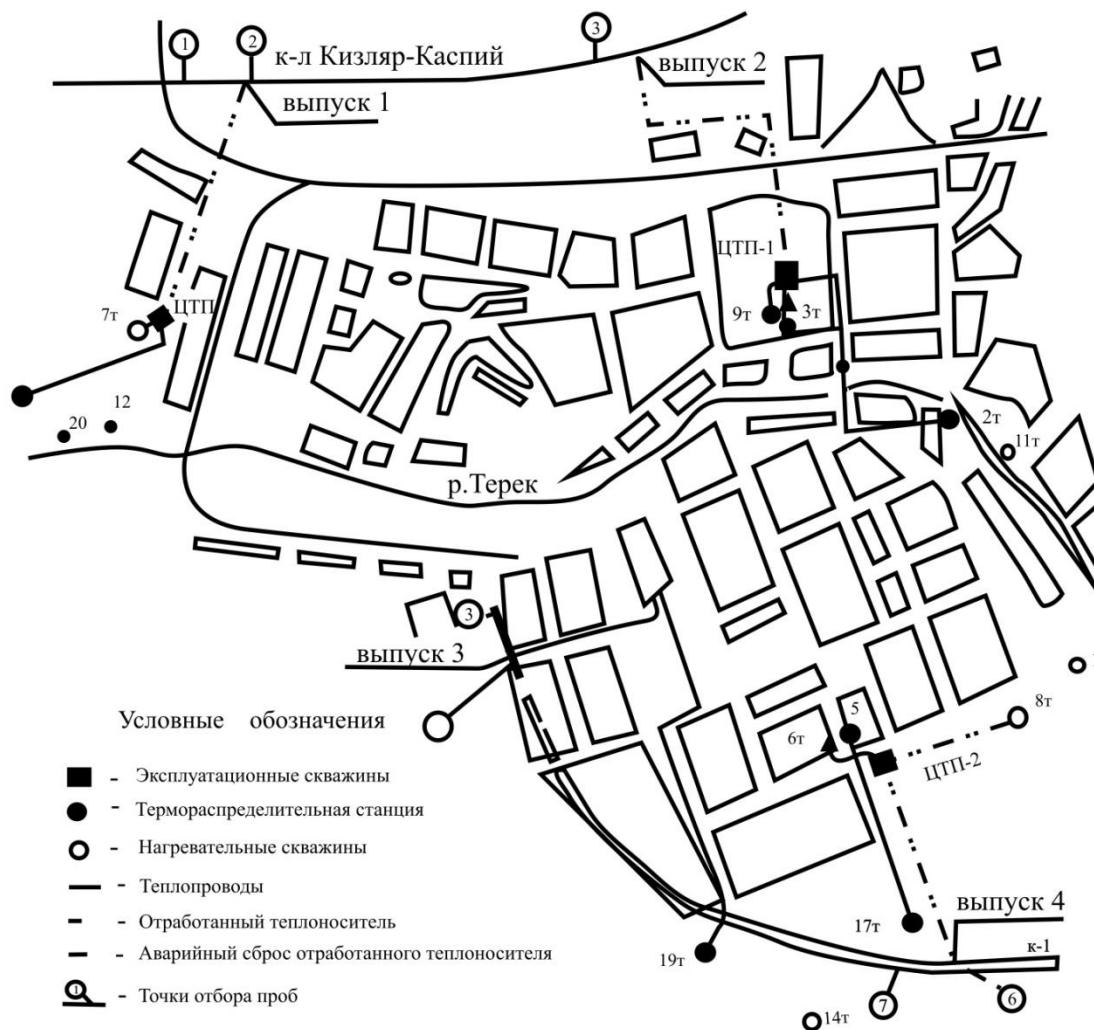
В воде карбонат кальция находится, как правило, в виде хорошо растворимой соли бикарбоната кальция:



Из уравнения (3) следует, что количество ионов  $\text{HCO}_3^-$  должно быть достаточным, чтобы удержать равновесное состояние карбоната кальция в геотермальной воде. Однако при снижении общего давления с выходом геотермальной воды в наземное оборудование имеет место нарушение карбонатно-кальциевого равновесия в растворе воды с уменьшением в ней концентрации углекислого газа. При этом, согласно уравнению (4), образуется твердая фаза  $\text{CaCO}_3$  как в виде отложений на стенках оборудования, так и в виде мелкодисперсной взвеси в растворе воды:



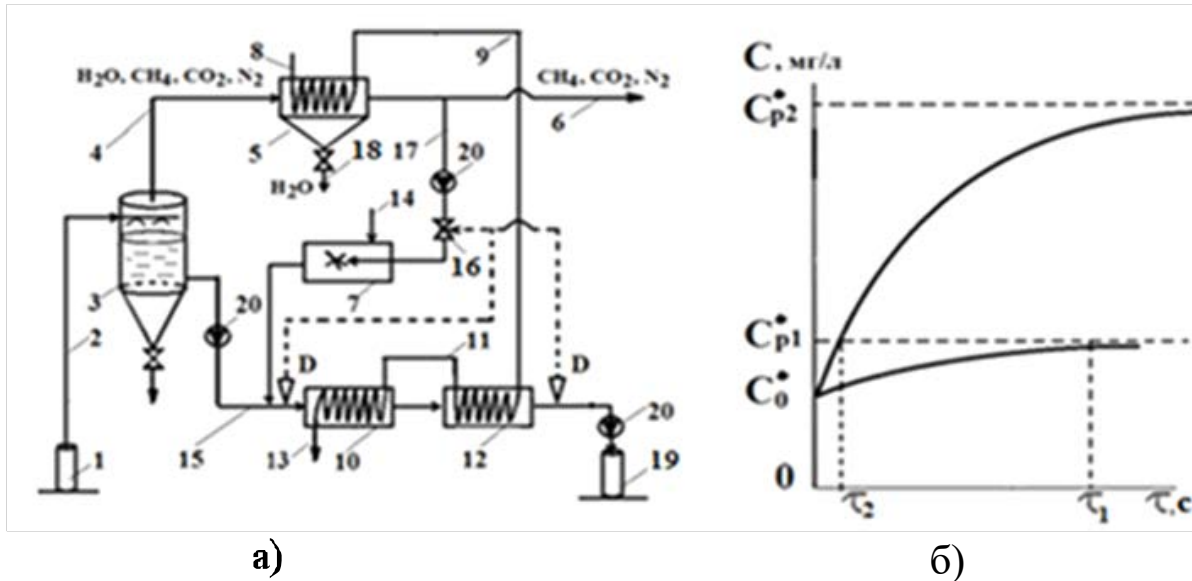
А значит, возникает опасность кольматации пласта при закачивании отработанной воды в нагнетательную скважину. Устранение этой проблемы возможно путем закачки в отработанную воду необходимого количества углекислого газа после предварительного удаления из воды попутного горячего газа – метана. В качестве углекислого газа можно использовать продукты сгорания части осушенного газа, где метан составляет более 60-70% от общего содержания газов.



**Рис. 3.** Схема геотермального теплоснабжения, горячего водоснабжения и сброса отработанной геотермальной воды в г. Кизляре.

Схема устройства, на котором реализуется решение данной проблемы, представлена следующим образом (рис. 4а): вода из скважины 2 через линию 1 поступает в газоотделитель 3, где давление опускается ниже давления насыщения воды газами. Геотермальная вода, освобожденная от сопутствующих газов, из нижней части газоотделителя 3 по линии 15 поступает к теплообменникам 10 и 12 и далее в скважину закачки 17. Выделившиеся газы отводят к потребителю по линиям 4 и 6 через осушитель газа 5. Часть газа по линии 21 поступает в камеру сгорания 7 через автоматически регулирующую запорную арматуру 22, а продукты горения поступают в геотермальную воду на линии 15 в точке подключения к теплообменнику 10. В осушителе 5 благодаря холодной воде, поступающей во вторичный контур по линии 8, пары воды из газовой смеси конденсируются. Конденсированная вода выводится по линии 23. Одновременно по линии 9 водопроводная вода, частично подогретая в осушителе 5 горючими газами, противотоком по вторичному контуру поступает в теплообменники 12 и 10. В дальнейшем по линии 13 она идет для подачи в систему отопления или горячего водоснабжения. Для обеспечения подачи газа и геотермальной воды к потребителям и далее в скважину закачки 17 предусмотрены насосы 20. Понижение давления ниже насыщения воды углекислым газом в газоотделителе 3 и в теплообменном оборудовании приводит к нарушению карбонатно-кальциевого равновесия в растворе геотермальной воды, что нередко имеет место на практике. В результате в теплообменном оборудовании образуются твердые отложения карбоната кальция, как наиболее распространенного вида отложений. Подача продуктов сгорания из камеры 7 в геотермальную воду на линии 15 способствует растворению углекислого газа в ней и

предотвращению отложения карбоната кальция в теплообменниках 10 и 12, а также и в скважине 17 закачки отработанной воды. При этом обеспечивается частичный подогрев геотермальной воды, идущей в теплообменники. Одновременно повышается и турбулизация потока воды в теплообменниках, что улучшает коэффициент теплопередачи через теплообменную поверхность в аридных климатических условиях. Регулирование подачи части горючего газа в камеру сгорания 7 осуществляется запорной арматурой 22 по показаниям датчиков D солеотложения, основанных на электропроводности воды, отложений и материала оборудования (Патент ..., 2009). Резервуар 16 служит для сбора излишнего количества углекислого газа, подаваемого в скважину 17, что регулируется запорной арматурой 18 и 19. Для увеличения дегазации и стабилизации геотермальной воды в дегазаторе 3 возможна обработка ее затравочными кристаллами (Ахмедов, 2010).



**Рис. 4.** Геотермальное устройство с утилизацией метана и защитой оборудования от карбонатных отложений: а) схема устройства с утилизацией  $\text{CH}_4$  и возвратом отработанных вод в водоносный горизонт, б) кинетика растворения  $\text{CO}_2$  при изменении равновесной концентрации его в геотермальной воде.

Для геотермального устройства (рис. 4) при вводе углекислого газа в геотермальную воду перед теплообменниками необходимо обеспечить ее равновесную концентрацию в возможно кратчайшие сроки. Так, уравнение кинетики растворения  $\text{CO}_2$  аналогично уравнению ее десорбции из воды:

$$C^* = C_p^* - (C_p^* - C_0^*)e^{-\frac{S^*\beta}{V}\tau} \quad (5),$$

где  $C^*$ ,  $C_p^*$ ,  $C_0^*$  – существующая, равновесная и начальная концентрация газа в воде при соответствующем давлении и температуре воды, моль/м<sup>3</sup>,  $S^*$  – площадь поверхности раздела фаз в единице объема  $V$ ,  $\beta$  – коэффициент десорбции,  $\tau$  – время, с. В связи с этим, для уменьшения времени растворения необходимого количества  $\text{CO}_2$  в воде до достижения значения концентрации  $C_{p1}^*$  рекомендуется увеличить парциальное давления углекислого газа до значения, соответствующего равновесному, на порядок выше (рис. 4б), чем для  $C_{p1}^*$ , т.е. до давления соответствующего равновесной концентрации  $C_{p2}^*$ , согласно закону Генри. Величину времени растворения  $\tau$  газа можно оценить исходя из формулы (5) для начальных давлений, соответствующих равновесным концентрациям газов в воде  $C_{p1}^*$  и  $C_{p2}^*$ :

$$\tau_1 = \frac{V}{S^*\beta} \ln \frac{C_{p1}^* - C_0^*}{(C_{p1}^* - C^*)} \quad (6),$$

$$\tau_2 = \frac{V}{S^*\beta} \ln \frac{C_{p2}^* - C_0^*}{(C_{p2}^* - C_{p1}^*)} \quad (7).$$

В формуле (6) для достижения равновесия в растворе воды необходимо стремиться получить концентрацию  $C_{p1}^*$  в течение времени  $\tau_1$ , стремящегося к бесконечности, в то время как для

получения концентрации  $C_{p1}^*$  для второго случая согласно формуле (7) время  $\tau_2$  гораздо меньше. Это вытекает из условия, что  $C_{p1}^* - C^* \gg C_{p2}^* - C_{p1}^*$  при  $C^*$  стремящемся к  $C_{p1}^*$ . Подача углекислого газа (рис. 4б) на линии 15 ввода геотермальной воды в теплообменники с парциальным давлением превышающим равновесное значение ускоряет стабилизацию воды и предотвращает образование карбонатных отложений в теплообменном оборудовании и в скважине закачки. В случае образования отложений в теплообменниках 10 и 12 появляется возможность их растворения путем подачи избыточного количества  $\text{CO}_2$  на линии 15.

### Заключение

Установлено, что отложение солей в оборудовании геотермальных систем происходит из-за нарушения углекислотного равновесия. Это значит, что при выходе из геотермальной воды углекислого газа, равновесие системы нарушается, что приводит к образованию твердой фазы карбоната кальция. Для стабилизации геотермальной воды необходимо поддерживать в ней равновесную концентрацию  $\text{CO}_2$  при определенной температуре воды и давлении. Следовательно, обратной закачкой попутных газов в систему можно предотвратить отложения карбоната кальция. Ввод углекислого газа в закачиваемую обратно в водоносный горизонт отработанную геотермальную воду обеспечивает долговечность работы скважин закачки. Эффективность утилизации попутного с водой газа метана увеличивается путем повышения площади поверхности раздела фаз за счет ввода в раствор геотермальной воды частиц кристаллической затравки.

Согласно проведенным исследованиям можно сделать вывод о необходимости утилизации горючих газов путем усовершенствования технических и технологических решений по эксплуатации геотермальных систем.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках Государственного задания Института геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН «Моделирование гидрогеологических условий Терско-Кумского артезианского бассейна в пределах Дагестана», № 1021060808495-2-1.5.13.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдуллаев А.Н., Залбеков Н.М., Гаджиев Я.М.-И. 1986. Изменение химического состава геотермальных вод при нагревании // Научно-технические проблемы комплексного использования возобновляемых источников энергии. Сборник научных трудов ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. М. С. 81-86.
- Акулиничев Б.П., Панченко А.С., Пугачева М.Ф. 1990. Водорастворенные газы Предкавказья и проблемы их использования в народном хозяйстве // Ресурсы нетрадиционного газового сырья и проблемы его освоения. Ленинград. С. 138-144.
- Ахмедов Г.Я. 2010. Повышение эффективности использования геотермальной воды для горячего водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. № 2. С. 18-23.
- Ахмедов Г.Я., Курбанисмаилова А.С. 2017. Об оценке стабильности геотермальных вод и защите оборудования от твердых отложений при утилизации попутных горючих газов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. № 4 (196). С. 71-76.
- Геотермальное теплохладоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. 1989. ВСН 56-87. Нормы проектирования. М.: Стройиздат. 50 с.
- Курбанисмаилова А.С. 2021. Экологические аспекты сжигания попутного горючего газа на геотермальных скважинах // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. № 2 (85). С. 69-74.
- Курбанисмаилова А.С., Ахмедов Г.Я., Эфендиев К.А., Ахмедова Л.М. 2019. Совершенствование методов эксплуатации энергетического оборудования при утилизации метана из геотермальных вод // Мониторинг. Наука и технологии. № 3 (41). С. 46-50.
- Курбанов М.К. 2001. Геотермальные и гидротермальные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика». 260 с.
- Патент 2344338 РФ, МПК F17D 1/16, G01B 17/02. 2009. Способ определения толщины отложений на внутренней поверхности трубопроводов // Бюллетень. № 2. 5 с.

ISSN 1993-3916

**ЖУРНАЛ АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ 2023. Т. 29. № 2 (95)**

Учредители: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского научного центра РАН (ПИБР ДНЦ РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Дагестанского научного центра РАН (ИГ ДНЦ РАН).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации в Роскомнадзоре (Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций) – ПИ № ФС77-56164 от 15 ноября 2013 г. Подписано в печать 20 июня 2023 г.



ТОВАРИЩЕСТВО НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ ЖМК

Формат 60x 90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>

Объем 21 п.л.

Тираж 200 экз.

Заказ №

Отпечатано в ООО «Галерея-Принт»  
111024, Москва, ул. 5-я Кабельтовая, д. 26

**Распространяется только по подписке**

**Индекс Э39775 (интернет каталог «Пресса России»)**

<https://www.ppressa-rf.ru/>

**Подписка на газеты и журналы на 2023 год Почта России**

Оформить подписку онлайн на журнал «Аридные экосистемы». Цена подписки на издание за минимальный подписной период — **1177.99** руб. Оплата подписки производится через филиалы Сбербанка РФ (для физических лиц), по безналичному расчету (для юридических лиц), банковской картой «Visa» и «MasterCard», другими электронными способами оплаты через сервис "Робокасса". Доставка товара осуществляется ФГУП "Почта России" бандеролью по всей территории России. По Москве и Московской области для журналов доступна курьерская доставка.