

*ISSN 1993-3916*

**Том 30      Номер 4 (101)      Декабрь 2024**

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**  
**2024**

© Журнал основан в 1995 г.  
Издается при поддержке  
Дагестанского федерального исследовательского 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.  
Подписка на русскую версию журнала осуществляется только по электронному интернет  
каталогу «Урал-Пресс» <https://www.ural-press.ru/catalog>

**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  
ДАГЕСТАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЦЕНТР РАН

ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РАН

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

## АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

**Том 30, № 4 (101), 2024, декабрь**

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, ДФИЦ РАН

Телефон: (872-2) 67-09-83

E-mail: arid\_journal@mail.ru

Москва: Товарищество научных изданий КМК

**2024**

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 30, номер 4 (101), 2024 декабрь

---

---

## СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

- Пространственно-временной анализ температуры воздуха, осадков и индекса аридности на территории бассейна озера Байкал  
*Е.А. Богданов, С. Хадбаатар, С.Н. Бажа* 4-20
- Изменения характеристик почвенных засух на европейской части России по наземным и спутниковым данным  
*Е.А. Черенкова, Т.Б. Титкова* 21-31
- Особенности метода итерации средних при изучении популяций  
*Ю.И. Сухоруких, С.Г. Биганова* 32-38
- Определение и картографирование поверхностно-карбонатных почв в сухостепной зоне Волгоградской области  
*И.Н. Горохова, Л.А. Тарнопольский* 39-47
- О закономерностях сезонных изменений водного режима почв аридных территорий  
*З.Г. Залибеков, Р.А. Магомедов, М.А. Мусаев, А.Б. Биарсланов, А.М. Ахмедов, П.Д. Мусалаева* 48-59
- Реконструкция палеоэкологических условий средней бронзы на основании исследования погребенных почв Каменского района Ростовской области  
*Г.В. Нестерук, К.В. Дюжова, А.Ю. Данильченко, А.Г. Щипанова, Э.В. Ларина* 60-69
- Антропогенное осолонцевание почв естественных пастбищ пустынно-степной зоны  
*А.В. Борисов, М.В. Ельцов, И.А. Идрисов, В.Н. Пинской, А.К. Ходжаева* 70-77
- Особенности радиального роста деревьев полезащитных лесных полос сухой степи  
*А.А. Шигимага, Н.И. Быков, Н.В. Рыгалова* 78-88
- Фитоценотическая характеристика и кормовая ценность люцерновых пастбищ Восточного чинка Устюрта  
*У.Ш. Саитжанова, Х.Ф. Шомуродов* 89-95
- Возможности изучения фауны и населения наземных позвоночных горных пустошей с помощью фотоловушек на примере восточной части хребта Тукуринга  
*С.А. Подольский, Д.С. Чемирская, В. Савочка* 96-106
- Орибатидные клещи Репетекского биосферного заповедника  
*П.Р. Хыдыров* 107-112
- Древние агроаншафты Дархатской котловины (Северная Монголия)  
*Т.Н. Прудникова* 113-125

---

## ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ

- Экологические стандарты здоровья аридных почв юга России при загрязнении нефтью и нефтепродуктами  
*Т.В. Минникова, С.И. Колесников, А.В. Кутасова, Н.С. Минин, В.Г. Гайворонский* 126-144
- Экзогенные процессы и почвенный покров в районе крупных водохранилищ  
*Ш.Г. Идармачев, В.И. Черкашин, А.Ш. Идармачев* 145-150

---

## **ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Пространственно-временное изменение минерализации воды  
искусственных водоемов Калмыкии

*С.С. Уланова, Н.М. Новикова, И.А. Горяев*

151-162

Влияние электрических полей рыбозащитного устройства  
на рыб дагестанского побережья Каспийского моря

*И.А. Столбунов, С.Н. Салиенко, Р.М. Бархалов, Н.И. Рабазанов, М.А. Маммаев,*

*И.С. Салиенко, А.А. Купцов, Я.А. Куликова, Е.А. Заботкина, Е.И. Извеков*

163-170

УДК 551.50

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, ОСАДКОВ И ИНДЕКСА АРИДНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ БАСЕЙНА ОЗЕРА БАЙКАЛ

© 2024 г. Е.А. Богданов\*, С. Хадбаатар\*\*, 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

\*\*Монгольский государственный университет образования  
Монголия, 14191, г. Улан-Батор, Хороо 8, ул. Бага Тойруу-14

Поступила в редакцию 06.06.2024. После доработки 01.07.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Территория бассейна оз. Байкала представляет собой сложную мозаику ороэкосистем, для которых антропогенные и природные процессы приводят к значимым и зачастую труднопрогнозируемым изменениям в структуре как отдельных экосистем, так и всего комплекса. Целью данной работы был пространственно-временной анализ некоторых климатических параметров как первичного звена энерго-массобмена, задающего общей тренд развития экосистем: средних значений температуры воздуха, количества осадков и индекса аридности. За период с 1975 по 2019 гг. были получены климатические данные по среднесуточной температуре воздуха с 84 метеостанций, а по количеству осадков – с 72 метеостанций. Эти данные были разбиты на периоды по 5 лет и обработаны в программах ГИС ArcMap 10.7 и Qgis 3.16; статистическая подготовка проводилась в среде программирования Python 3.10. Построение растров распределения осадков и температуры было проведено с использованием Spline-метода интерполяции. Мы построили серии карт распределения средних значений температуры воздуха, суммарного количества осадков и индекса аридности по Мортону, а также серии крупномасштабных карт распределения средних значений температуры воздуха с учетом морфометрических особенностей земной поверхности. Отмечено, что наиболее устойчиво-направленные изменения годовой температуры воздуха наблюдаются в российской части бассейна, а наибольшая скорость трансформации температурного поля по годовым значениям характерна для горных районов Монгольской части (отроги Хангая и Хэнтэй). Основная доля прироста значений годовой температуры воздуха приходится на теплый период, причем она сформирована за счет Монгольской части бассейна.

Наибольшая изменчивость количества осадков теплого периода соответствует горным районам Хангая (запад южной части бассейна – аймак Завхан, юго-западная часть аймака Хубсугул), а также долинному комплексу Орхон-Селенгинского междуречья. Наблюдаются сильные различия временной динамики осадков холодного периода между северной и южной частями бассейна. Так, за 1975-2019 гг. прирост осадков в российской части составил только 4%, в то время как в монгольской части – около 40% от среднего значения выпавших осадков за холодный период данных лет. Для территории характерны разнонаправленные изменения значений индекса аридности. Выделены два крупных очага усиления засушливости: южная и центральная части аймака Булган совместно с восточной оконечностью Архангайского аймака представляют монгольский очаг роста засушливости, а центральная часть Республики Бурятия – российский очаг аридности.

Детали методики построения растров и обработки исходных данных расположены в базе данных «ГИС Экосистемы бассейна оз. Байкал» (2024), где также представлен подробный анализ рассмотренных параметров климата как в масштабе всего бассейна, так и на уровне отдельных его административно-территориальных единиц.

*Ключевые слова:* температура воздуха, осадки, иссушение, климатические поля, индекс аридности, интерполяция, бассейн Байкала.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-4-20**

**EDN: YYGGKN**

Как известно, климатические изменения накладывают свой отпечаток на трансформацию экосистем различного масштаба (Гунин и др., 2007; Коломыц, 2008; Мохов, Петухов, 2000; Кудеяров и др., 2009; Бажа и др., 2008; 2020; Горбатенко и др., 2011; Ипполитов и др., 2008; Fick, Hijmans, 2017). Многие авторы отмечают ярко выраженные изменения ряда климатических параметров и в пределах территории бассейна оз. Байкал (Григорьев и др., 2019, 2020; Шимараев, Старыгина, 2010; Густокашина, Буфал, 2003; Латышева и др., 2011). Интенсивная хозяйственная деятельность в сложной системе динамичных ороэкосистем и глобальные изменения климата приводят к непредсказуемым трансформациям в структуре земельного покрова на значительной территории (Гунин и др., 2017; Краснощеков, 2004; Лебедев, 1982; Коломыц, 2003; Бажа и др., 2019).

В связи с этим целью данной работы является пространственно-временной анализ наиболее значимых с позиции экологии климатических параметров: температуры воздуха и осадков. Для решения поставленной цели решался ряд задач:

- 1) поиск и отбор данных с метеостанций с последующим формированием из них базы данных по двум параметрам: температура и количество осадков;
- 2) выбор наиболее оптимального метода пространственной интерполяции данных с последующим построением временных рядов пространственных изменений температурного и влажностного полей (за годовой, теплый и холодный периоды) для их последующего анализа;
- 3) построение временных рядов пространственных изменений и анализ данных индекса аридности.

### Материалы и методы

За период с 1975 по 2019 гг. были отобраны климатические данные по среднесуточной температуре воздуха из 50 метеостанций в российской части и еще из 34 метеостанций в монгольской части бассейна, расположенных на территории и в непосредственной близости к границам бассейна. Сбор первичных данных осуществлялся с сайта ВНИИГМИ-МЦД (Специализированные массивы ..., 2022) для российской части и из Национального агентства по Метеорологии и гидрологии и мониторингу окружающей среды Монголии (National Agency ..., 2024).

Все климатические параметры были разбиты на периоды по 5 лет и интерполированы в геоинформационной среде ArcMap 10.7 и Qgis 3.16, статистически обработаны на языке программирования Python. Для интерполяции первичных растров был выбран Spline-метод, который имеет одну из наименьших ошибок при разреженном расположении метеостанций. Чтобы учесть плотность распределения точек и исключить линии разломов, опытным путем были подобраны коэффициенты анизотропии и углы отклонения области расчёта уравнений интерполяции. При этом особенностью построенных ниже картосхем пространственного распределения того или иного индекса является учет так называемого «метеорологического» рельефа, т.е. цифровой модели рельефа, построенной по фактическим высотам точек расположения метеостанций (рис. 1).

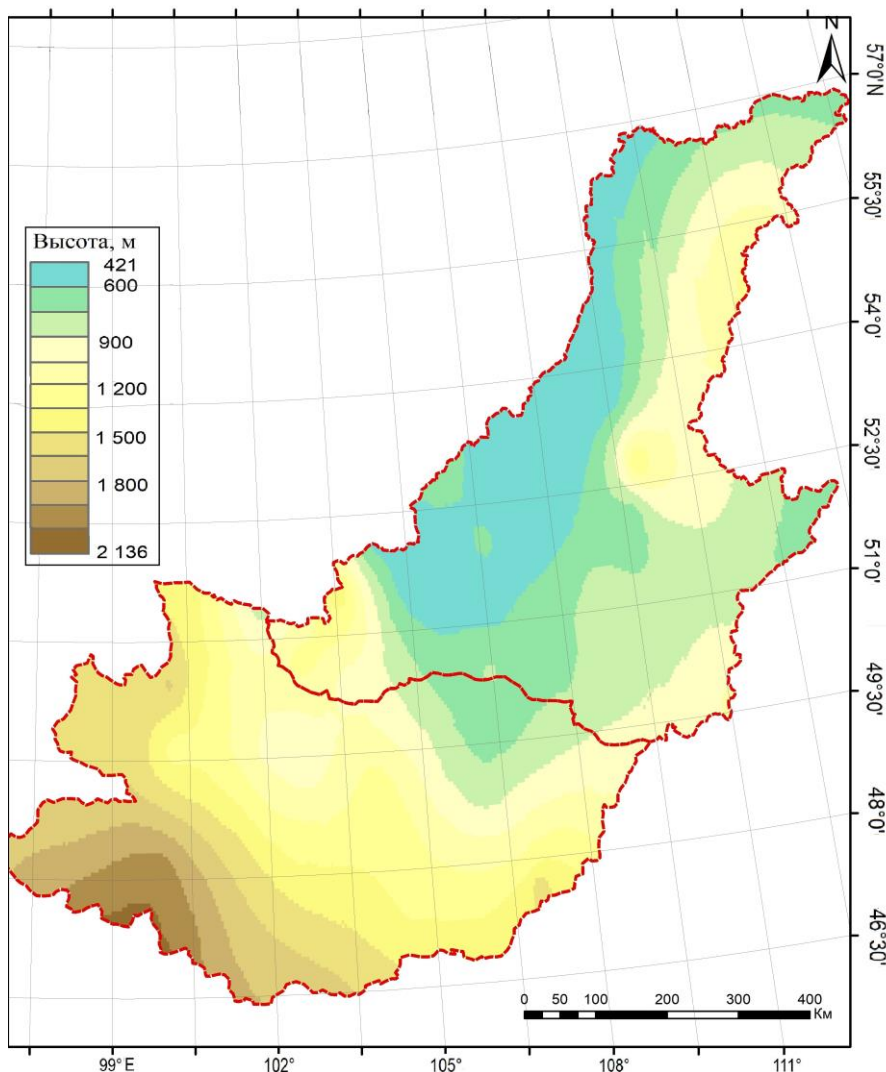
Использование данной модели помогло нивелировать влияние сложного пересеченного рельефа территории. Чтобы нивелировать высоты метеостанций, мы выполнили ряд несложных операций.

1. Построение сетки квадратов с размером 45 x 45 км и запись в значение каждого квадрата высоты «метеорологического» рельефа (среднего значения по квадрату после приведения значений высот каждого квадрата к нормальному распределению). Размер квадрата сетки был задан как половина среднего расстояния между ближайшими метеостанциями.

2. Нахождение среднего значения высоты «метеорологического рельефа» бассейна Байкала, который составил 1185 м н.у.м. БС, и расчёт амплитуды высоты, т.е. разности между высотой, записанной в каждом квадрате, и средней высотой «метеорологической» цифровой моделью рельефа (ЦМР).

3. Построение интерполяции поверхностей температуры по данным метеостанций на основе Spline-метода.

4. Пересчет температуры воздуха к усредненной цифровой модели рельефа (ЦМР) с учетом амплитуды высоты (шаг 2) по следующим правилам: в теплый период с заданным температурным градиентом –  $-0.55/+100$  м; в зимний период – с учетом позиции метеостанции и форм рельефа (табл. 1). Для учета позиции метеостанций была построена карта морфогенетических типов рельефа, отображающая котловины и их типы. Это особенно актуально для зимнего времени, когда на данной территории доминирует инверсионный характер распределения температур.



**Рис. 1.** «Метеорологический рельеф» бассейна оз. Байкал, построенный по данным высот метеостанций.

Похожим образом мы построили карты распределения температуры воздуха в крупном масштабе (размер квадрата – 5 x 5 км) и с учетом особенностей рельефа.

Результаты и детали методики построения крупномасштабных климатических полей можно посмотреть в базе данных «ГИС Экосистемы бассейна оз. Байкал» (2024). Там же представлен подробный анализ ниже описываемых параметров климата как в масштабе всего бассейна, так и на уровне отдельных его административно-территориальных единиц.

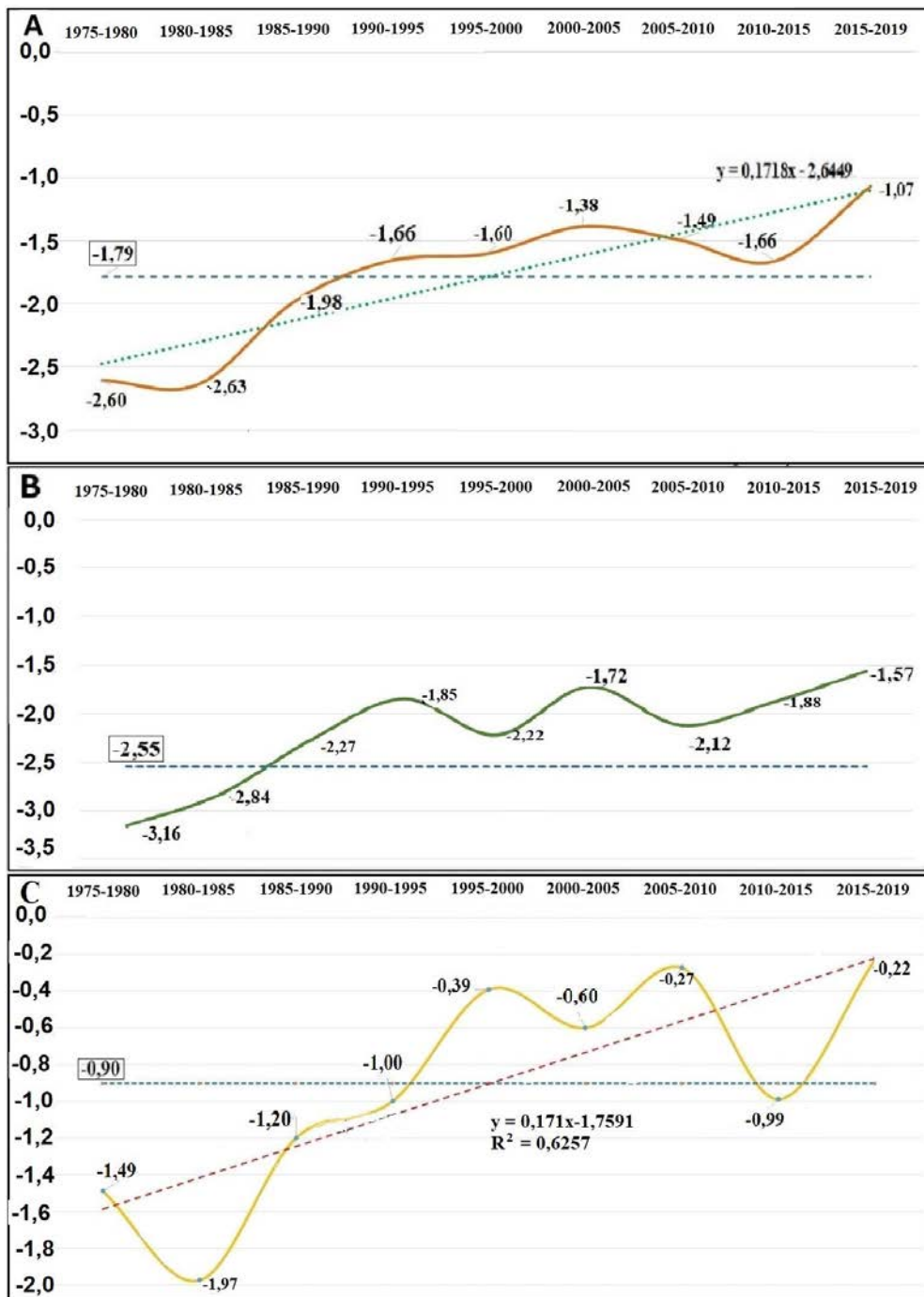
**Таблица 1.** Распределение коэффициентов (температурных градиентов) в зависимости от типа котловины (Береснева, 2006).

Замкнутая котловина	Полузамкнутая котловина	Продуваемая котловина
1.1	0.9	0.65

### Результаты и обсуждение

*Температура воздуха.* Для ее анализа были усреднены данные 84 метеостанций за 3 периода: годовой, теплый и холодный. Теплым считался период с середины апреля по середину октября, а холодным – с середины октября по середину апреля. Исходя из наличия данных, для российской (северной) части бассейна анализировались данные с 1950 г., для монгольской (южной) – с 1975 г.

На рисунке 2 показаны общие тенденции изменения среднемноголетней годовой температуры воздуха в пределах всего бассейна (А), для российской части бассейна (В) и для южной (монгольской) части (С).



**Рис. 2.** Графики временного хода среднемноголетней годовой температуры воздуха с их линейными трендами, формулами и коэффициентами детерминации.

Согласно рисунку 2, отмечаются следующие общие особенности количественных изменений температуры воздуха:

- по всей территории (рис. 2А) наблюдается увеличение среднегодовой температуры воздуха за период 1975-2019 гг. в среднем на 1.55°C при скорости 0.17°C за 5 лет; в период 1990-1995 гг.

температура переходит через значение средней температуры за весь период;

- за последние 45 лет среднегодовая температура воздуха монгольской части бассейна (рис. 2С) увеличилась на  $1.59^{\circ}\text{C}$ , средняя температура этой части бассейна составляет  $-0.9^{\circ}\text{C}$ , что практически в два раза выше средней температуры по всему бассейну;

- среднегодовая температура воздуха в российской части бассейна (рис. 2В) увеличилась на  $1.45^{\circ}\text{C}$ , при этом превысить среднее значение по бассейну ( $-1.79^{\circ}\text{C}$ ) в российской части ей удалось лишь в 2010-2015 гг. Средняя температура российской части составляет  $-2.55^{\circ}\text{C}$ , что на  $0.8^{\circ}\text{C}$  ниже средней по бассейну и практически на  $2.0^{\circ}\text{C}$  ниже, чем в монгольской части.

Сглаженной кривой линией показан ход температуры воздуха по данным метеостанций, горизонтальной пунктирной линией показана средняя температура воздуха за исследуемый период, а прерывистой точечной линией, расположенной под углом, показан результат аппроксимации температурной линии линейной регрессии. У каждой линии подписано уравнение, задающее эту линию.

Повсеместное увеличение среднегодовой температуры воздуха, наблюдаемое по всему бассейну, имеет свои локальные особенности на каждой отдельной метеостанции. На таких метеостанциях, как Красный Чикой, Баргузин, Хилок, Жигалово, Иркутск, Улан-Удэ в российской части бассейна и Мурэн, Буян-Уха, Улан-Батор в монгольской, произошло увеличение среднегодовой температуры воздуха в пределах от  $1.9^{\circ}\text{C}$  до  $2.1^{\circ}\text{C}$  за исследуемый период. В свою очередь такие метеостанции, как Хутаг, Орлинга и Сухэбатор, за последние 45 лет имеют температурную прибавку в интервале от  $0.3^{\circ}\text{C}$  до  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

Пространственные различия, обуславливающие контрастный характер распределения температурного поля на территории бассейна, отражены на рисунке 3. Анализ рисунка 3 позволяет отметить основные особенности хода температур. Так, по данным за 1975-1980 гг., на территории бассейна выделяется 3 «центра тепла»: аймак Уверхангай и Южная часть аймака Булган; Западная часть Центрального аймака и регион Улан-Батор; южная оконечность оз. Байкал (Республика Бурятия). Кроме того, в период 1975-1995 гг. наблюдалось усиление позиций «центров тепла», выраженное в последующем увеличении температуры в этих центрах и в их незначительном площадном расширении.

Экологически наиболее значимым представляется изучение показателей температур вегетационного периода и температур периода заморозков. Пример общих пространственных закономерностей среднемноголетних значений температур теплого периода бассейна Байкала показан на рисунке 4.

Согласно данным метеорологических станций (рис. 5), среднемноголетняя температура теплого периода за последние 45 лет усредненно по всей территории возросла на  $2.06^{\circ}\text{C}$ . При этом скорость ее прироста составляет  $0.2^{\circ}\text{C}$  за один период (т.е. за 5 лет). Среднее значение среднемноголетней температуры теплого периода за последние 45 лет достигло  $12.46^{\circ}\text{C}$ . Переход графика через данную отметку осуществился в целом по региону в период 1995-2000 гг.

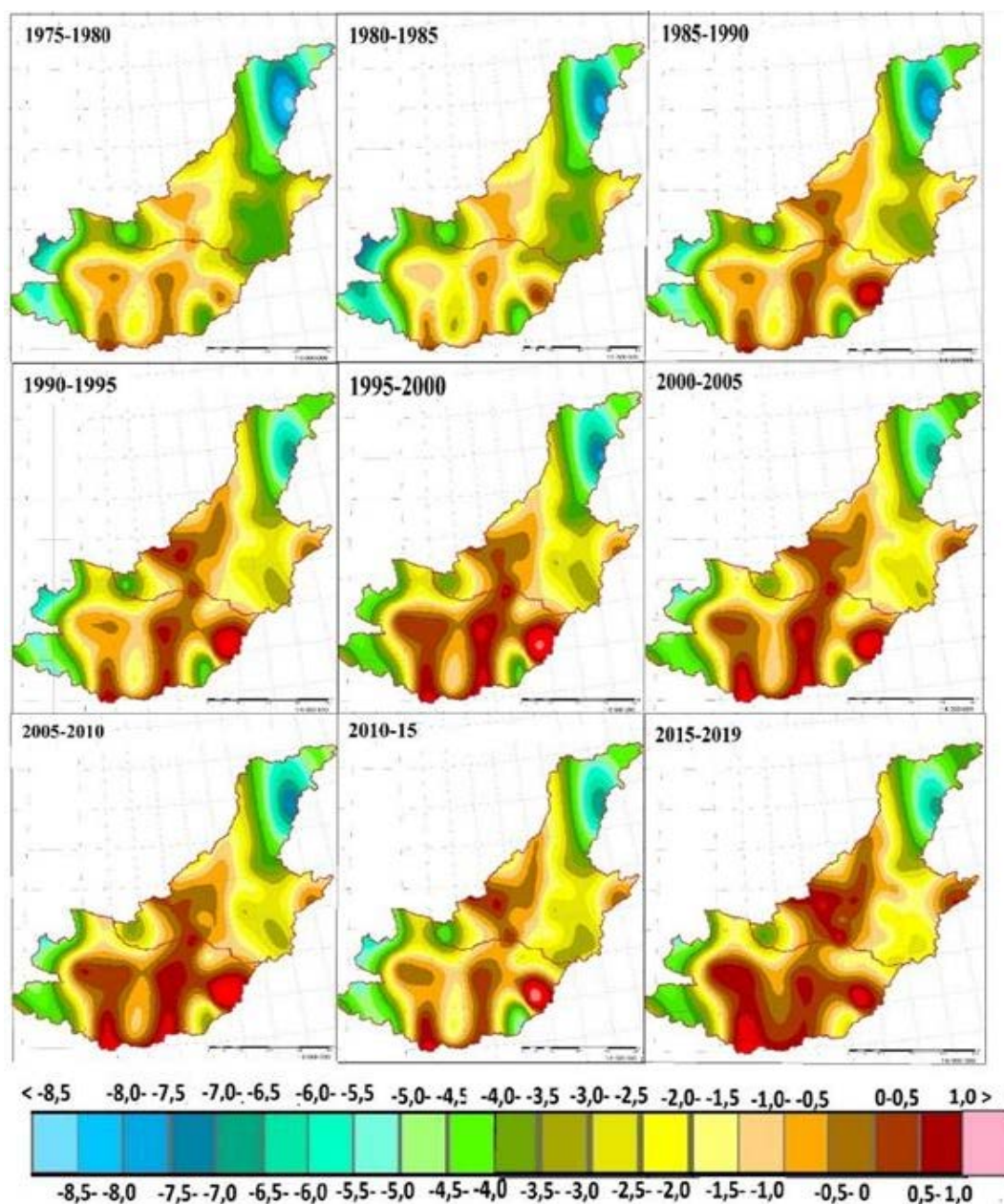
Отличительной чертой временного хода температуры теплого периода является практически ровное равномерное увеличение значений с 1980-1985 по 1995-2000 гг., которое затем сменяется синусоидным типом кривой.

На территории российской части бассейна в 1975-2019 гг. (рис. 5В) температура воздуха увеличилась на  $1.85^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура за период составляет  $12.28^{\circ}\text{C}$ , что всего на  $0.2^{\circ}\text{C}$  ниже средней величины по всему бассейну. Переход графика через среднюю величину по бассейну осуществляется в 1995-2000 гг. Средняя скорость прироста температуры за каждую пятилетку составляет  $0.2^{\circ}\text{C}$ .

Анализ хода графиков температуры теплого периода и данных метеостанций в российской части бассейна позволяет сказать, что с 1950 и до 1980 гг. летние температуры не носят выраженного направленного характера, а остаются в пределах  $0.5^{\circ}\text{C}$  от среднего значения за данный период. Последующие 15 лет характеризуются довольно выраженным ростом среднемноголетних температур на  $1.5^{\circ}\text{C}$ . Отмечено, что с 1995 года ход температуры вновь приобретает циклический характер, с общим сдвигом в сторону роста температур.

Южная часть бассейна отличается, как по основным количественным показателям, так и по структуре хода графика. Так, прирост температуры составил  $2.35^{\circ}\text{C}$ . Начало роста температуры

приходится на период 1990-1995 гг., тогда как для российской части бассейна такой температурный скачок берет начало в 1980-1985 гг., что практически на 10 лет раньше. При этом, повышение температуры воздуха в южной части бассейна выражено гораздо сильнее, что проявляется в сужении временного отрезка в 2 раза: с 20 лет, для российской части бассейна, и до 10 лет – на монгольской.



**Рис. 3.** Распределение среднемноголетних годовых температур по территории бассейна Байкала.

Стоит особенно отметить, что за последние 45 лет увеличение среднемноголетней температуры теплого периода в бассейне Байкала идет повсеместно.

Согласно данным климатических метеостанций за период 1975-2019 гг. произошли значительные температурные изменения (рис. 6).

По результатам метеорологических наблюдений, за период 1975-2019 гг. значения среднемноголетней температуры холодного периода увеличились всего на 0.48°C. Средняя температура холодного периода за весь цикл наблюдений (1975-2019 гг.) по данным метеостанций всей территории бассейна Байкала составляет -16.54°C.

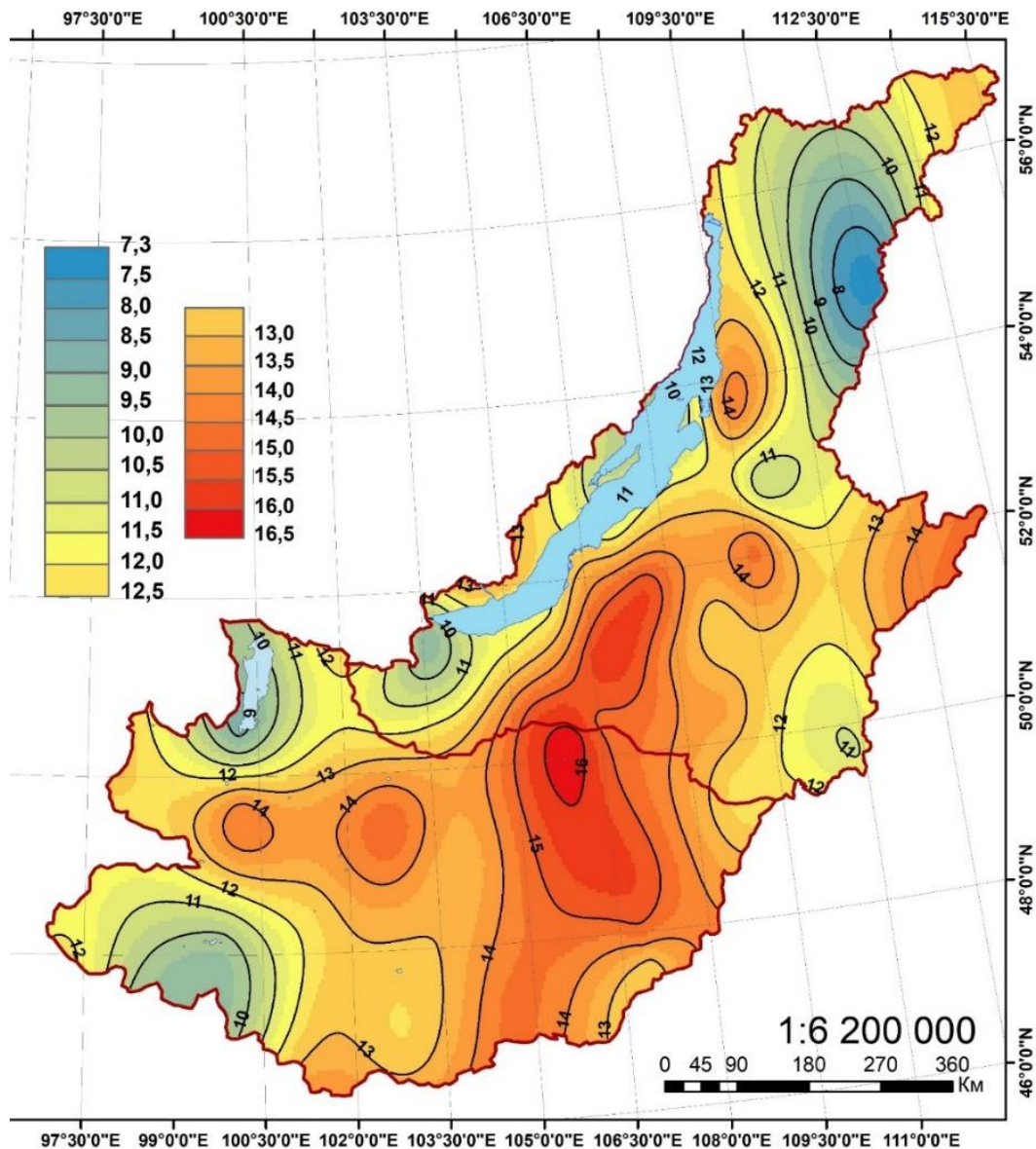
Подводя итог, можно выделить следующие главные особенности в пространственно-временном

изменении температурного поля на территории бассейна оз. Байкал за 1975-2019 гг.

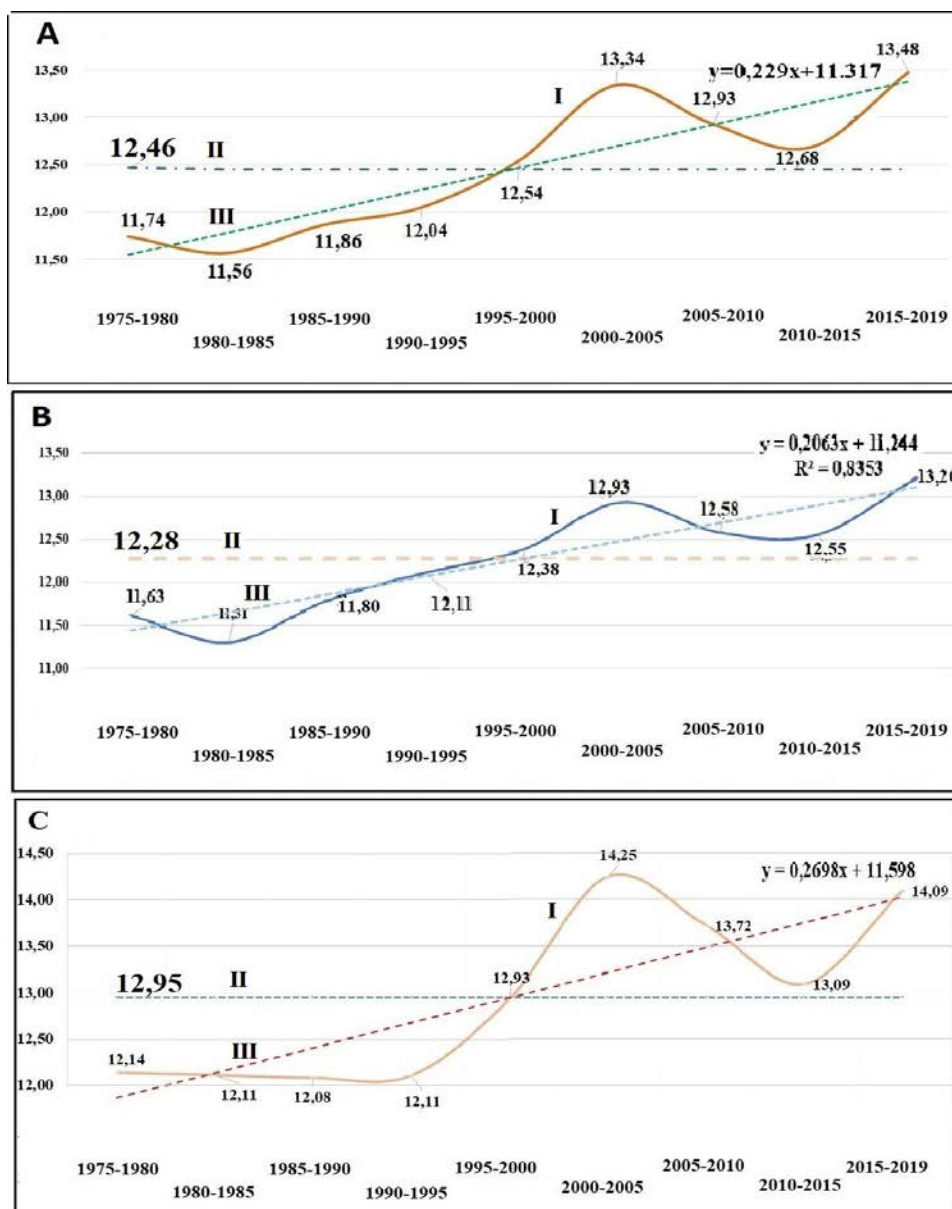
- На всей территории возросла среднемноголетняя годовая температура воздуха практически с равными значениями для российской и монгольской частей, но наиболее устойчиво-направленные изменения наблюдаются в российской части. Наибольшая скорость трансформации температурного поля по годовым значениям характерна для горных районов Монгольской части (отроги Хангая и Хэнтэй).

- Основная доля прироста значений среднегодовой температуры приходится на прирост составляющей «теплого» периода. При этом наибольший рост среднемноголетней температуры теплого периода характерен для Монгольской части, а наибольшая устойчивость (меньшая изменчивость значений температуры) – для российской.

- Среднемноголетняя температура холодного периода возросла очень незначительно. В российской части с 1950 года наблюдаются довольно устойчивые темпы ее роста, а в южной части они, наоборот, снизились. Наибольшие трансформации температурного поля за период 1975-2019 гг., где отмечено понижение, соответствуют долинному комплексу Орхон-Селенгинского междуречья, а в некоторых горных районах российской части (Баргузинский и Северо-Муйский хребты) температуры ощутимо повысились.



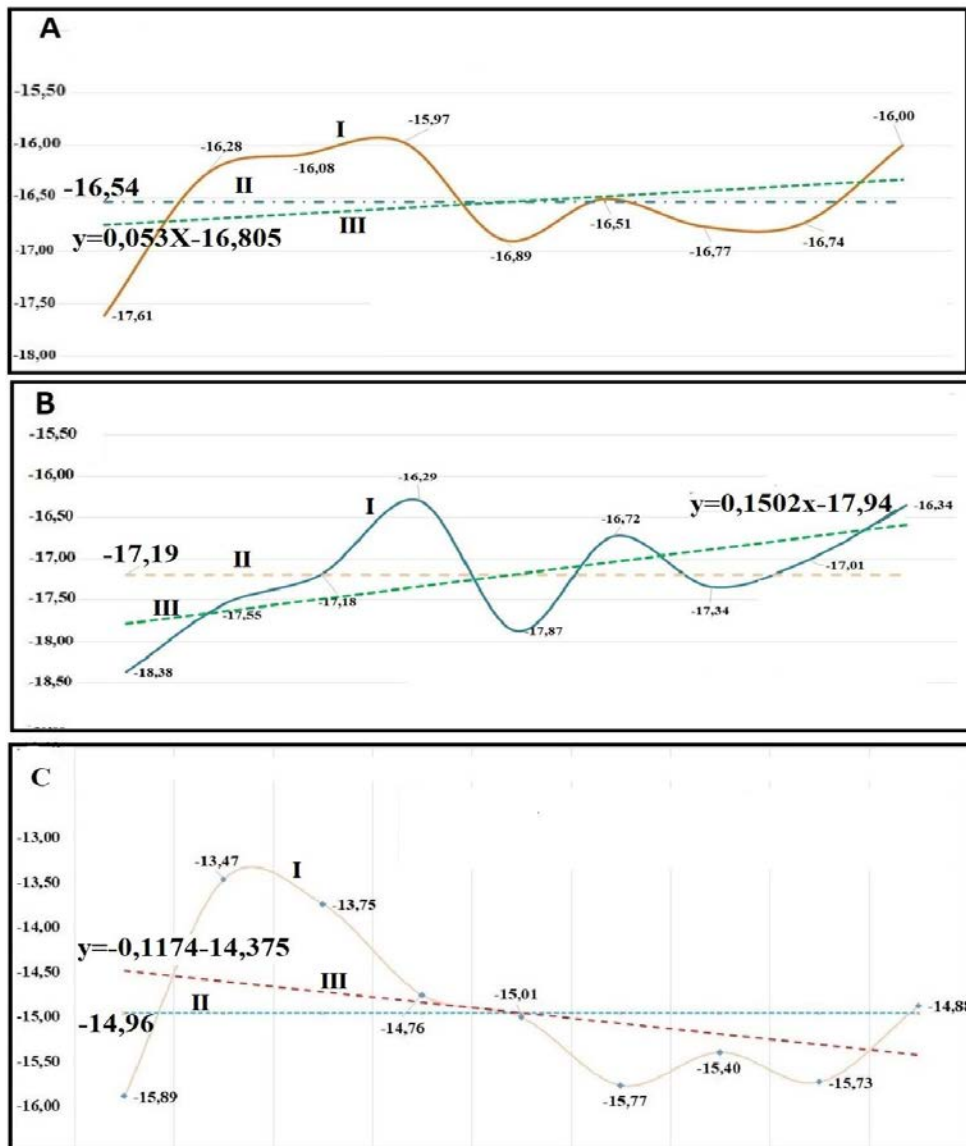
**Рис. 4.** Температурное поле среднемноголетней температуры воздуха теплого периода 1990-2019 гг. АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2024, том 30, № 4 (101)



**Рис. 5.** Графики временного хода среднемноголетней температуры воздуха теплого периода на территории всего бассейна оз. Байкал (А), российской части (В), монгольской части (С). Условные обозначения: I – среднее значение температуры воздуха теплого периода по метеостанциям, II – среднее многолетнее значение за весь период наблюдений, III – линейная (среднее значение температуры теплого периода по метеостанциям) функция.

*Количество осадков.* Наряду с температурой воздуха важнейшим экологическим фактором является обеспеченность территории влагой. Известно, что вся влага, циркулирующая внутри и между экосистемами, поступает из атмосферы. Соответственно, наиболее значимым первичным показателем влагообеспеченности территории является количество и распределение выпадающих на территории осадков.

Согласно рисунку 7А, общее количество годовых осадков по метеостанциям всего бассейна практически не изменилось. Коэффициент линейной регрессии равен  $-0,0017$  при коэффициенте детерминации линейной регрессии  $-R^2=0,005$ . Это говорит об отсутствии направленного линейного тренда и высокой вариабельности выпадающих осадков между соседними периодами. Аналогичная ситуация наблюдается в обеих частях бассейна (рис. 7 В, С), где коэффициенты линейной регрессии составляют  $-0,7$  при  $R^2 = 0,006$  и  $0,24$  при  $R^2 = 0,0004$  соответственно.



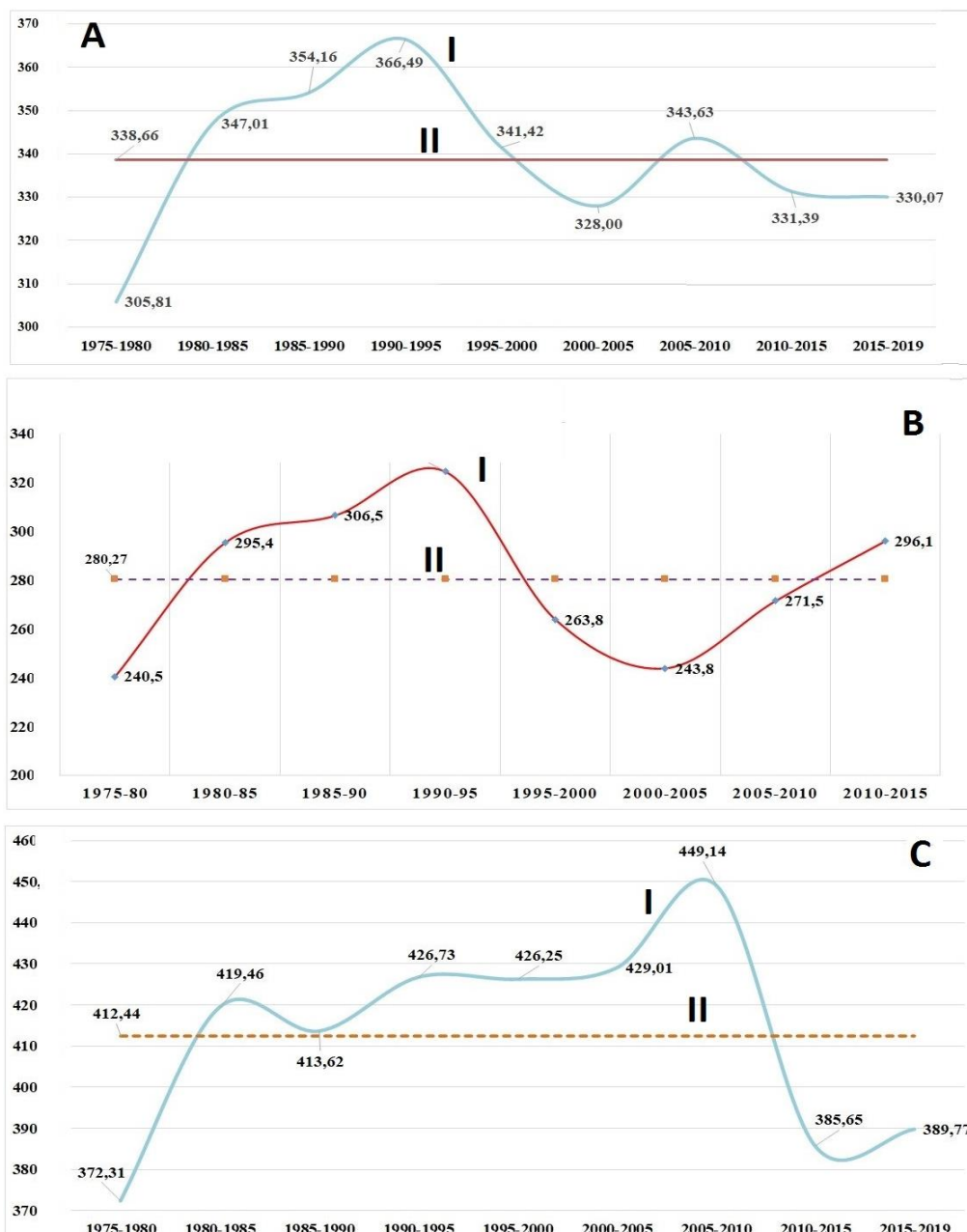
**Рис. 6.** Графики временного хода среднемноголетней температуры воздуха холодного периода: А – на территории всего бассейна, В – в российской части бассейна, С – в монгольской части бассейна оз. Байкал. Условные обозначения: I – среднее значение температуры воздуха холодного периода по метеостанциям, II – среднее многолетнее значение за весь период наблюдений, III – линейная (среднее значение температуры холодного периода по метеостанциям) функция.

При всей определенной схожести линейных функций сами графики имеют свои особенности.

1. На графике годового хода осадков всей территории с 1995-2000 гг. постепенно снижаются значения отклонений осадков от среднего значения по всей территории за весь период по сравнению с 1975-1995 гг. Так, значение стандартных отклонений за 1975-1995 гг. составляет 22,9 мм, а за период 1995-2019 гг. – 7,2 мм. Таким образом, вариабельность осадков за последние 25 лет снизилась в 3 раза. Согласно графику временного хода, этот период характеризуется снижением амплитуды циклов при увеличении их частоты.

2. Средние многолетние значения годового количества осадков за весь период составляют 338,6 мм для территории всего бассейна, 280,3 мм для южной (монгольской) части и 412,4 мм для северной (русской) части.

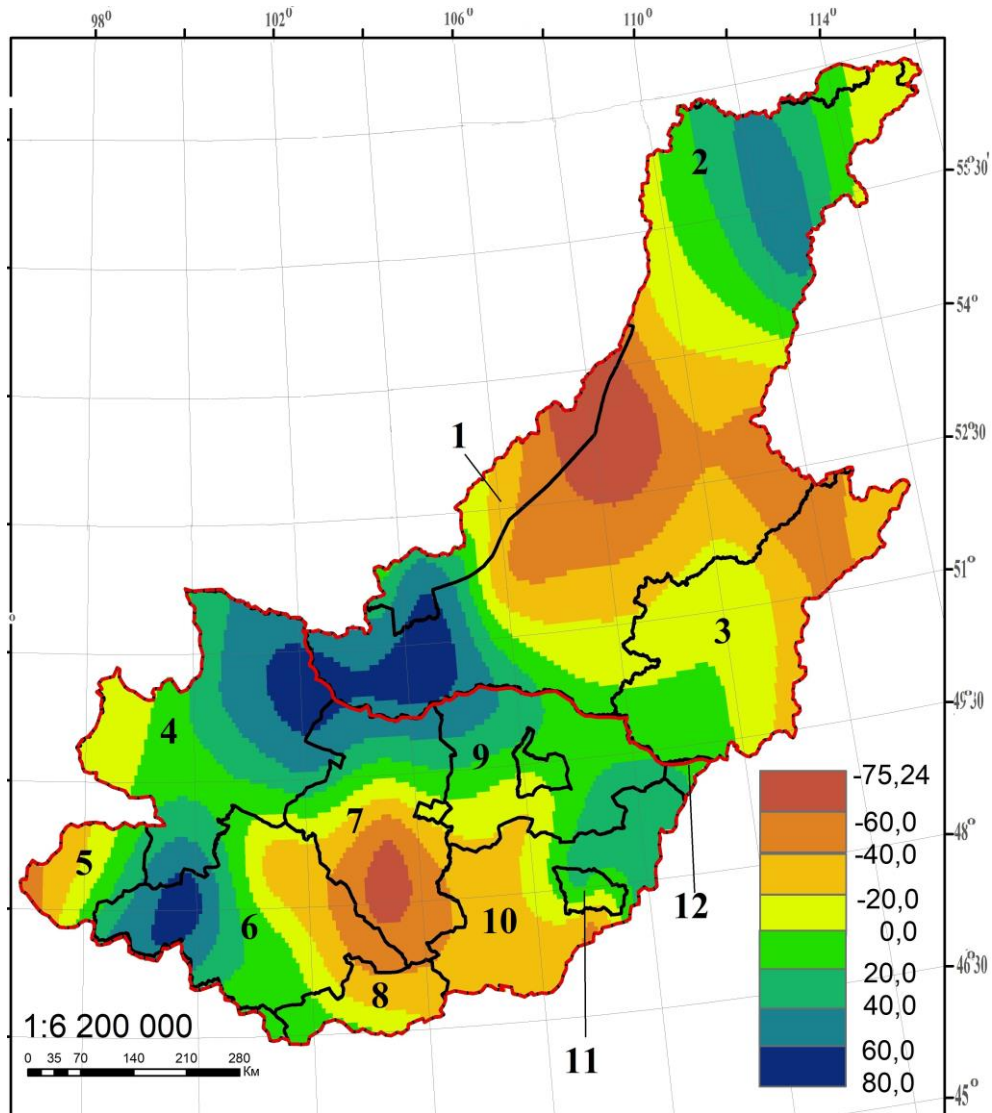
3. Стандартное отклонение в южной части бассейна составляет 30 мм за весь период при практически неизменном цикле, составляющем 13-15 лет.



**Рис. 7.** Графики временного хода среднемноголетнего годового количества осадков за 1975-2019 гг. Условные обозначения: А – по данным метеостанций всего бассейна, В – монгольской части бассейна, С – российской части бассейна, I – средне многолетнее годовое количество осадков, мм, II – среднее значение годового количества осадков за весь период, мм.

Несмотря на отсутствие линейных трендов в изменении осадков по всей территории, отчетливо выделяются пространственные трансформации поля осадков (рис. 8). Степень вариации поля осадков показывает, что существуют зоны его повышенной изменчивости, такие как Орхон-Селенгинский долинный комплекс, а также наиболее высокие гипсометрические уровни отрогов Хангая.

Среднее значение модуля прироста/убыли среднемноголетнего количества годовых осадков составляет 77.5 мм, что составляет 23% от среднего значения годового количества осадков для всей территории за весь исследуемый период. В свою очередь, среднее значение модуля прироста/убыли осадков теплого периода на территории бассейна составило 74 мм или 29% от среднего значения количества осадков теплого периода для всей территории, или 34% от среднего значения для южной части бассейна и 24% от среднего значения осадков теплого периода в российской части бассейна.



**Рис. 8.** Изменение поля значений среднемноголетних годовых осадков за период 1975-2019 гг.

Наибольшая изменчивость количества осадков теплого периода соответствует горным районам Хангая (запад южной части бассейна – аймак Завхан, юго-западная часть аймака Хубсугул), а также долинному комплексу Орхон-Селенгинского междуречья (рис. 9).

Внутриконтинентальное положение и морфометрическая защищенность территории от влагонесущих воздушных потоков с океана оказывает сильное влияние на влагообеспеченность территории в зимнее время. Доля осадков холодного периода составляет от 2 до 9% в южной части бассейна и до 35% в северной. Морозная и малоснежная зима в южной части за счет формирования особых «зимних» биогеоценотических связей во многом задает тот темп развития и существования экосистем, который наблюдается в настоящее время.

Динамика осадков зимнего периода, несмотря на их малую долю в общей структуре годовых осадков, является важнейшим экологическим условием существования экосистем с нынешней структурой и функционированием. Графики временного хода среднемноголетних значений количества осадков холодного периода представлены на рисунке 10, согласно которому общее количество осадков холодного периода на всей территории увеличилось на 4.5 мм, что составляет немногим более 10% от среднего количества осадков, выпавших на всех метеостанциях за рассматриваемый период.

В свою очередь, наблюдаются сильные различия временной динамики осадков холодного периода между северной и южной частями бассейна. Так, за период 1975-2019 гг. прирост осадков

в российской части составил всего 3.12 мм или 4% от среднего количества выпавших там осадков за исследуемый период, а в монгольской части – 6.3 мм или почти 40% от среднего значения выпавших осадков в холодный период.

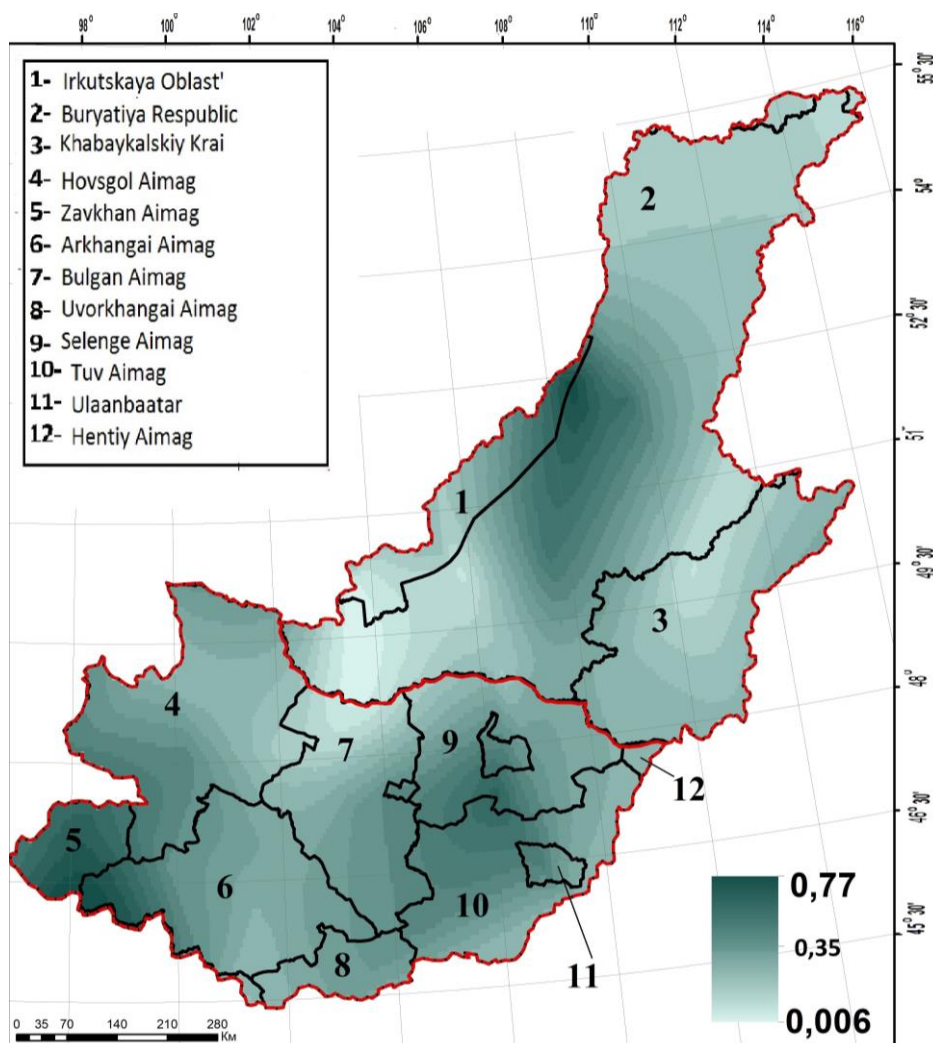


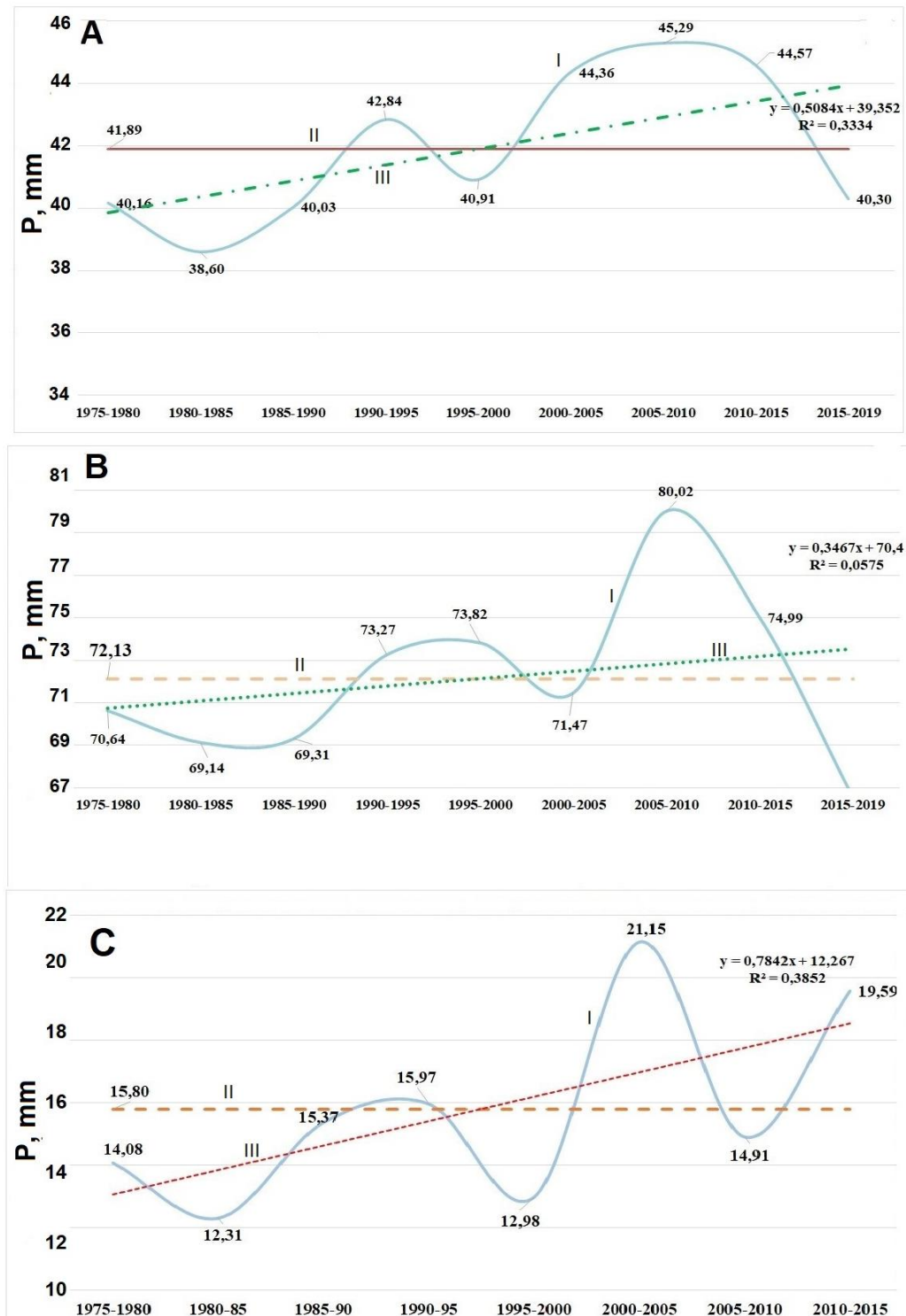
Рис. 9. Распределение коэффициента вариации осадков теплого периода

Отличительной чертой хода осадков холодного периода является изменение их амплитуды и фазы (частоты) цикла. Так, в обеих частях бассейна наблюдается увеличение амплитуды и сужение цикла во времени. Иными словами, с 1995 г. в южной части бассейна и с 2000 г. в российской части отклонения значений выпадающих осадков от средней величины возрастают на 2-3 мм за каждые 5 лет, притом что сам цикл (положительный или депрессивный) сокращается с 13-15 до 11-12 лет.

Среднее количество осадков, выпавших за холодный период 1975-2019 гг., в российской части в 4.5 раза превышает среднее значения осадков холодного периода южной части бассейна.

*Индекс аридности/засушливости* является одним из наиболее информативных показателей, отображающих характер влияния температуры воздуха и осадков на жизнедеятельность организмов. Среди наиболее популярных индексов аридности было принято решение взять индекс по Мортону, представляющий собой отношение между осадками и температурой воздуха, увеличенной на 10 единиц:  $R / (t + 10)$ , где  $R$  – годовая сумма осадков, см,  $t$  – средняя годовая температура, °C (The Encyclopedia ..., 1987).

Индекс аридности рассчитывался для теплого периода, как наиболее значимого с позиции продуктивности экосистем. Пространственные изменения поля значений индекса аридности Мортонна представлены на рисунке 11.



**Рис. 10.** Графики временного хода среднегогодечного количества осадков холодного периода 1975-2019 гг.: А – на территории всего бассейна, В – в российской части бассейна, С – в монгольской части. Условные обозначения: I – среднегогодечное количество осадков холодного периода, мм, II – среднее значение количества осадков, мм, III – линейная (среднегогодечное количество осадков холодного периода, мм) функция.

На рисунке 11 выделяются несколько важных особенностей:

- На территории исследования локализованы три очага аридности: юго-запад бассейна – аймак Завхан и юго-запад Хубсугульского аймака; долинный комплекс Орхон-Селенегинского междуречья

и центральная часть республики Бурятия; восточное побережье оз. Байкал. При этом последние два центра распадаются на две части. Так, монгольский Орхон-Селенгинский центр распадается на южный и северный (приграничный) очаги аридности, а Бурятский центр аридности – на Баргузинский и долинно-Селенегинский очаги.

• Согласно обработке данных, усредненно на всей территории наблюдается уменьшение значений индекса аридности. При этом наиболее подходящей функцией, описывающей ход средних значений индекса Мортон, является полином 4 степени со значением детерминации 0.86.

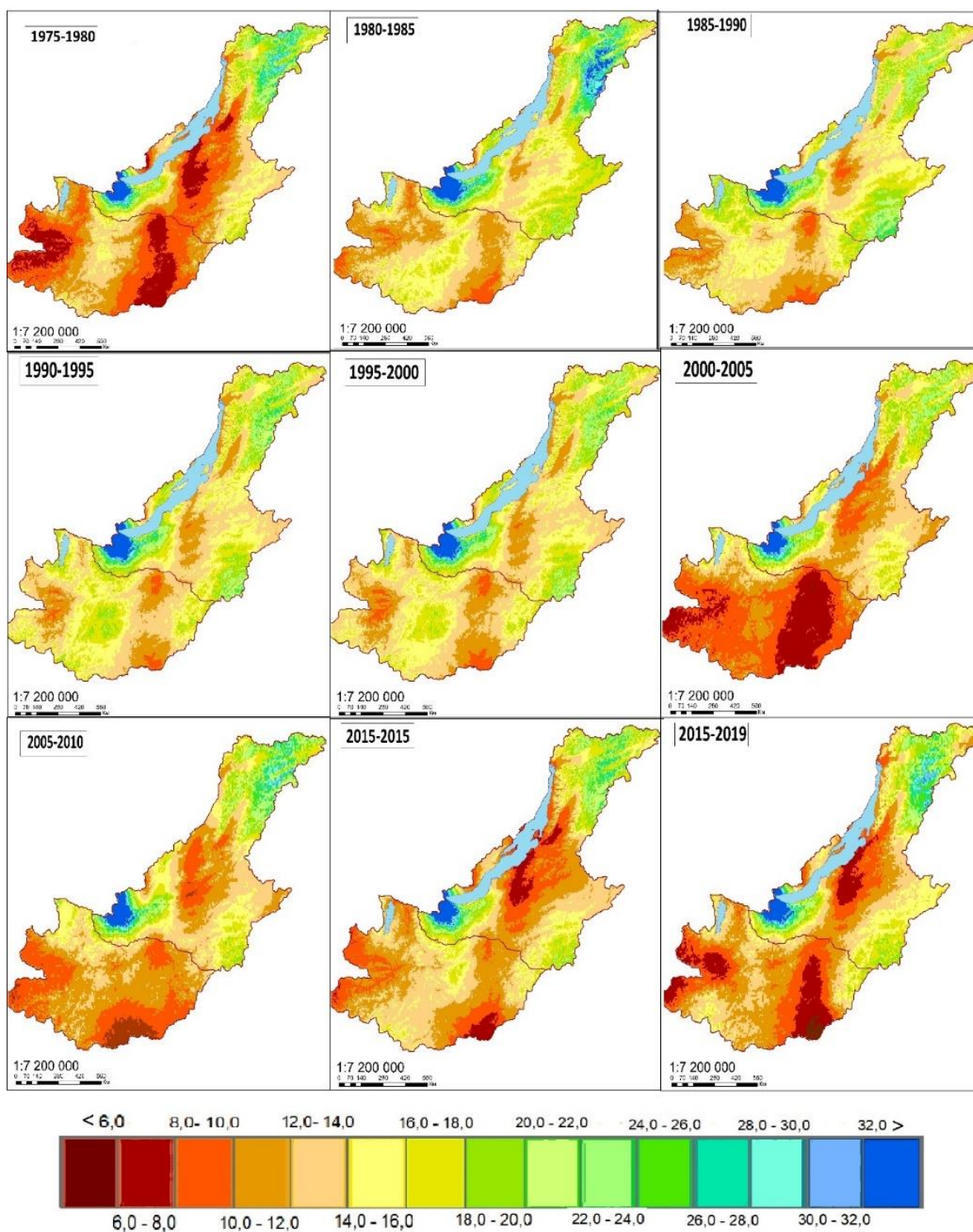
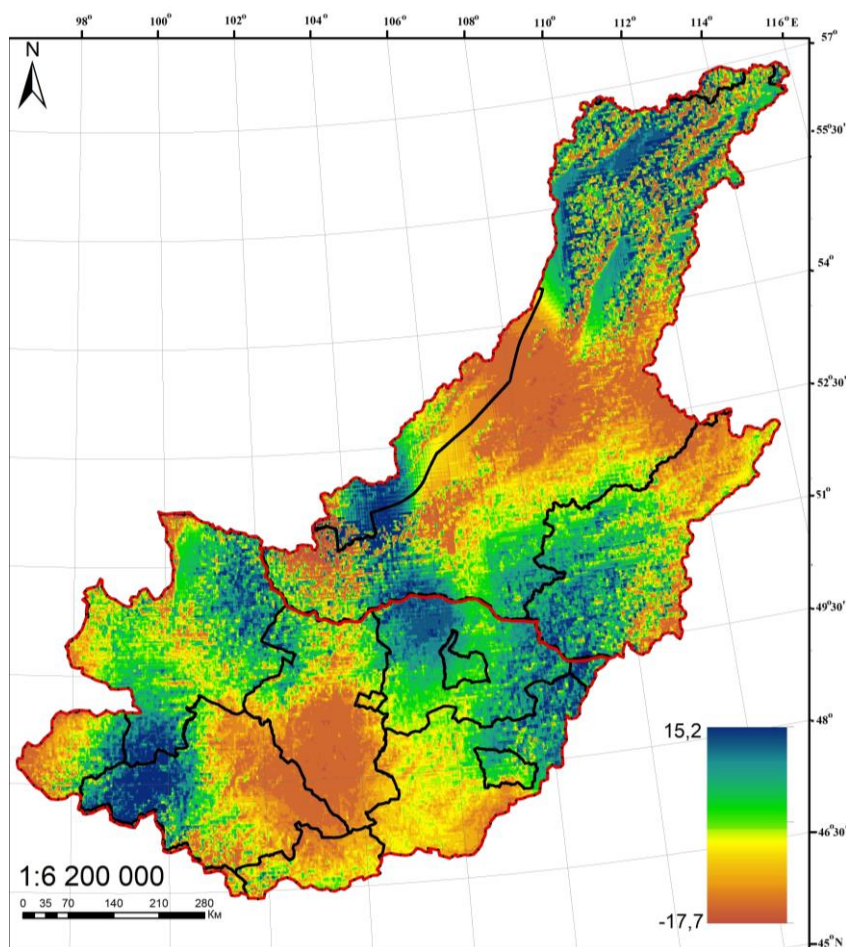


Рис. 11. Пространственная динамика индекса аридности Мортон за теплый период.

По графику на рисунке 11 можно выделить два периода различного поведения поля значений индекса Мортон. *Первый период* – 1975-1990 гг., для него характерно увеличение осредненного по всей территории значения индекса аридности, что указывает на ослабление засушливости на территории. В данный период происходит усиление мозаичности пространства значений индекса, а к его концу отчетливо локализуются три ранее описанных аридных центра (рис. 11). *Второй период* характеризуется направленным усилением аридности по всей территории и сопровождается постепенным расширением влияния поля центров засушливости и срастанием их в единое аридное пространство, средние значения которого, например, в южной части бассейна, не превышают 10 единиц (за 2000-2010 гг.).

Динамика индекса аридности по Мортону за теплые периоды 1975-2019 гг. представлена на рисунке 12. Отрицательные значения указывают на то, что за последние 45 лет индекс уменьшился, т.е. на данной территории усиливается засушливость.



**Рис. 12.** Динамика индекса Мортон теплого периода 1975-2019 гг

Для территории характерны разнонаправленные изменения поля значений индекса аридности за рассматриваемый период. По рисунку 12 можно выделить два крупных очага усиления засушливости (увеличения индекса аридности, а значит, области отрицательных значений динамики индекса): южная и центральная части аймака Булган совместно с восточной оконечностью Архангайского аймака представляют монгольский очаг роста засушливости, а центральная часть Республики Бурятия – российский очаг.

### Выводы

Подводя итог, стоит отметить повсеместное увеличение среднемноголетней температуры теплого периода за последние 45 лет, имеющее свои региональные особенности, которые показаны в данной

работе. На более чем 50% исследуемой территории произошло увеличение годовой температуры на 1.4-1.8°C, еще на 16% – на 1.2-1.4°C, еще на 14.8% – на 1.8-2.0°C. Наибольшими температурными изменениями характеризуются следующие регионы: аймаки Хубсугул, Завхан, Архангай, Улан-Батор, а также Забайкальский край. Наименьшие температурные изменения приходятся на долинные комплексы Орхон-Селенгинского междуречья, где средний прирост температуры составил всего 1.0-1.2°C.

Ведущим климатообразующим фактором на территории бассейна оз. Байкал в зимнее время выступает обширная область высокого давления – Азиатский максимум, центр которой располагается в южной части. Доля осадков холодного периода составляет от 2 до 9% в южной части и до 35% в российской. Такие климатические условия (морозная и малоснежная зима в южной части) за счет формирования особых «зимних» биогеоценотических связей задают тот темп развития и существования экосистем, который наблюдается в настоящее время.

Следует также особо подчеркнуть, что сформированный за длительное время развития экосистем общий единый механизм адаптации к климатическим условиям не покрывает те изменения в параметрах глобальной климатической системы, которые будут оказывать влияние на территорию бассейна оз. Байкала и трансформировать происходящие изменения. Это обусловлено тем, что довольно сильные количественные и качественные изменения климатических параметров происходят в короткий срок. Одновременно на все эти процессы накладывается хозяйственная деятельность человека, которая за последние 40-45 лет претерпела сильные изменения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бажа С.Н., Андреев А.В., Данжалова Е.В., Дорофеев Н.И., Дробышев Ю.И., Петухов И.А., Хадбаатар С.* 2020. Динамика наземных природных экосистем Монголии за 1989-2017 гг. // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 3. С. 193-231.
- Бажа С.Н., Басхаева Т.Г., Гунин П.Д., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Чултэмийн Д.* 2019. Основные пути обезлесения лесостепных ландшафтов на южной границе бореальных лесов в Монголии // Лесной вестник. № 2. С. 45-54.
- Бажа С.Н., Гунин П.Д., Дробышев Ю.И., Екимова Н.В., Прищепина А.В.* 2008. О региональных особенностях процессов обезлесивания на южной границе хвойных лесов Монголии // Лесной вестник. № 2. С. 44-55.
- Береснева И.А.* 2006. Климаты аридной зоны Азии. М.: Наука. 286 с.
- ГИС Экосистемы бассейна оз. Байкал. 2024 [Электронный ресурс <https://mon-exp.nextgis.com/resource/0> (дата обращения 04.06.24)].
- Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Логинов С.В., Поднебесных Н.В., Харюткина Е.В.* 2011. Роль циркуляционных факторов в потеплении климата Сибири // Вестник Томского государственного университета. № 346. С. 174-180.
- Григорьев В.Ю., Сазонов С.А., Миллионщикова Т.Д.* 2019. Оценка влияния изменения основных климатических параметров на многолетний водный баланс бассейна Байкала за 1936-2016 гг. // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. С. 399-403.
- Григорьев В.Ю., Миллионщикова Т.Д., Сазонов С.А., Чалов С.Р.* 2020. Влияние изменения климатических параметров на сток рек бассейна Байкала во второй половине XX – начале XXI вв. // Вестник Московского университета. Серия 5 «География». № 5. С. 3-11.
- Гунин П.Д., Бажа С.Н., Балданов Б.Ц., Басхаева Т.Г., Дробышев Ю.И., Дугаржав Ч., Цыремпилов Э.Г.* 2017. Обезлесение – одна из важнейших экологических проблем бассейна озера Байкал // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1. № 3. С. 38-99.
- Гунин П.Д., Востокова Е.А., Бажа С.Н., Дугаржав Ч., Ульзийхутаг Н., Прищепина А.В.* 2007. Экосистемы Монголии: разнообразие, современное состояние и охрана // Экосистемы внутренней Азии: вопросы исследования и охраны. М.: Типография Россельхозакадемии. С. 4-21.
- Густокашина Н.Н., Буфал В.В.* 2003. Многолетние изменения основных элементов климата на территории Предбайкалья. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН. 107 с.
- Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Харюткина Е.В.* 2008. Структура и динамика метеорологических полей на азиатской территории России в период интенсивного глобального потепления 1975-2005 гг. // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. Т. 1. № 4. С. 323-344.
- Коломыц Э.Г.* 2003. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука. 376 с.
- Коломыц Э.Г.* 2008. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука. 428 с.
- Краснощечков Ю.Н.* 2004. Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 223 с.
- Кудеяров В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А.* 2009. Глобальные изменения

- климата и почвенный покров // Почвоведение. № 9. С. 1027-1042.
- Латышева И.В., Лощенко К.А., Шахаева Е.В.* 2011. Исследование динамики Азиатского антициклона и холодных циркуляционных периодов на территории Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». Т. 4. № 2. С. 161-171.
- Лебедев А.В.* 1982. Гидрологическая роль горных лесов Сибири. М.: Наука. 184 с.
- Мохов И.И., Петухов В.К.* 2000. Центры действия в атмосфере и тенденция их изменения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 3. С. 321-329.
- Специализированные массивы для климатических исследований. 2022 [Электронный ресурс <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml> (дата обращения 04.06.24)].
- Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н.* 2010. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968-2007 гг.) // География и природные ресурсы. № 3. С. 62-68.
- Fick S.E., Hijmans R.J.* 2017. WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas // International Journal of Climatology. Vol. 37. No. 12. P. 4302-4315.
- National Agency Meteorology and the Environmental Monitoring. 2024 [Электронный ресурс <http://namem.gov.mn/eng> (дата обращения 04.06.24)].
- The Encyclopedia of Earth Sciences. 1987. Vol. XI: The Encyclopedia of Climatology / Eds. J.E. Oliver, R.W. Fairbridge. N.Y.: van Nostrand Reinold. 103 p.

**ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЕННЫХ ЗАСУХ  
НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

© 2024 г. Е.А. Черенкова\*\*\*, Т.Б. Титкова\*

\*Институт географии РАН

Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4. E-mail: [cherenkova@igras.ru](mailto:cherenkova@igras.ru)

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

Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

Поступила в редакцию 03.04.2024. После доработки 01.08.2024. Принята к публикации 01.04.2024.

Исследованы изменения повторяемости, интенсивности и продолжительности сильных почвенных засух в верхних слоях почвы в мае и июне на европейской части России южнее 55° с.ш. в период 1981-2020 гг. по данным наблюдений влажности почвы в пахотном слое 19 гидрометеостанций, а также в слое глубиной 10 см по данным модели GLEAM с использованием спутниковых измерений. Выявлена тесная связь почвенного увлажнения в мае-июне по спутниковым данным с атмосферным увлажнением в апреле-июне.

Анализ полученных результатов свидетельствует об увеличении повторяемости засух в поверхностном слое почвы, обусловленных экстремально низким увлажнением, в начале вегетационного сезона на наибольшей части исследуемой территории в первое двадцатилетие XXI века по сравнению с предыдущим двадцатилетием. При этом наибольший статистически значимый рост повторяемости засух (на 4 события больше) в мае-июне в период 2001-2020 гг. по сравнению с предыдущим двадцатилетием отмечался в Центральном Черноземье, Поволжье, Заволжье, в Приазовье и на Черноморском побережье. Увеличение повторяемости засух происходило на фоне наиболее ощутимого снижения влаги в поверхностном слое почвы в период 2001-2010 гг. В то же время увеличение продолжительности таких засух в мае-июне в тех же регионах было наибольшим и составляло от 15 до 30 дней. Рост повторяемости засух в Поволжье и Заволжье сопровождался значительным снижением почвенной влажности, наибольшим на территории исследования. Установлено, что большинство наиболее сильных обширных засух в поверхностном слое почвы в мае и июне наблюдалось с начала текущего столетия.

Показано, что направленность изменений повторяемости засух в пахотном слое почвы под яровой пшеницей в мае-июне по гидрометеостанциям зависит от выбора критерия определения засух и имеет значительно бóльшую вариативность по сравнению со спутниковыми данными.

*Ключевые слова:* влажность почвы, почвенная засуха, спутниковые данные, европейская часть России.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-21-31**

**EDN: XVDFXG**

Согласно выводам, опубликованным в шестом докладе ИРСС, масштабы современных изменений в климатической системе являются беспрецедентными (ИРСС, 2021). Изменения ассоциируются с негативными последствиями меняющегося климата для различных экосистем, прежде всего, для растительных сообществ и агроэкосистем. В этой связи возрастает важность проблемы продовольственного обеспечения населения. В последние десятилетия в России получены рекордные урожаи зерна. В то же время климатически обусловленная урожайность пшеницы в регионах европейского зернового пояса России снижается, в т.ч. из-за увеличения напряженности термического режима вегетационного периода зерновых культур (Павлова и др., 2020), а также роста экстремальности климата летом (Черенкова, Семенов, 2021).

Доступность почвенной влаги является одним из ключевых факторов существования растительных сообществ, произрастающих в районах с существенной межгодовой изменчивостью увлажнения в сезон вегетации в сельскохозяйственных районах европейской части России (ЕЧР).

Недостаточное почвенное увлажнение сельскохозяйственных растений приводит к их стрессу, уменьшению биопродуктивности и урожайности (Бережа и др., 2015; Хлебникова и др., 2012). Сильные и экстремальные почвенные засухи вызывают «в ряде случаев катастрофическое снижение продуктивности сельскохозяйственных культур» (Хомякова, Зоидзе, 2002). Особенностью современных засух является то, что они наблюдаются при более высоких температурах воздуха, которые ассоциируются с ростом испарения и иссушением почвы. Исследованию связи различных типов засух (атмосферной, атмосферно-почвенной, почвенной), а также их влиянию на продуктивность сельскохозяйственных культур посвящен ряд научных работ. Отмечается, что важным фактором в формировании и развитии атмосферных засух является обратная связь влажности почвы и температуры воздуха, которая может поддерживать и усиливать засуху (Seneviratne et al., 2010). Наиболее сильные атмосферные засухи летом 1972 и 2010 гг. на ЕЧР сопровождались резким дефицитом почвенной влаги на обширной территории (Страшная, Богомолова, 2005; Фролов, Страшная, 2011). Установлено, что возникновению крупномасштабной засухи на ЕЧР может способствовать существенный дефицит весенней почвенной влаги в соседнем регионе (Володин, 2011). Показано, что значимый рост урожайности яровой пшеницы в Приазовье и Центрально-Чернозёмном районе в среднем за годы западной фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов по сравнению с его восточной фазой связан с увеличением количества осадков в мае благодаря интенсификации циклонической активности над регионом (Черенкова и др., 2015).

Исследования изменений характеристик почвенных засух являются актуальными, поскольку в агрометеорологическом контексте почвенная засуха стоит на первом месте по существенности влияния на продуктивность сельскохозяйственных культур (Хомякова, Зоидзе, 2002). Помимо этого такие исследования важны в связи с оценкой роли иссушения верхних слоев почвы при возникновении природных пожаров. В то время как проблемы, связанные с атмосферной засухой, поднимались многими учеными-исследователями, в изучении почвенной засухи все еще имеется много пробелов.

Изменение влажности в поверхностных слоях почвы является важным звеном в системе «подстилающая поверхность – атмосфера», его необходимо рассматривать в качестве главного регулятора испарения с поверхности суши. Иссушение поверхностного слоя почвы в сезон вегетации часто ассоциируется с уменьшением способности почв впитывать влагу. Необходимость исследования характеристик засух в поверхностных слоях почвы продиктована тем, что их прогрессирующее иссушение создает благоприятные условия для стационарирования антициклонов и развития длительной атмосферно-почвенной засухи. Прогресс в накоплении данных дистанционного зондирования с конца 1970-х годов, позволяющих моделировать влажность почвы на различных глубинах, открывает широкие перспективы исследований изменений характеристик влажности почвы, в т.ч. почвенных засух.

Цель статьи состоит в изучении изменений характеристик почвенных засух в поверхностных слоях почвы в начале вегетации в сельскохозяйственных районах ЕЧР за последние сорок лет по наземным и спутниковым данным. В статье предпринята попытка выделить годы наиболее обширных интенсивных почвенных засух по спутниковым данным.

### Материалы и методы

Территория исследования расположена на ЕЧР, с севера она ограничена 55° с.ш., с востока – 60° с.ш. Существующие эмпирические критерии почвенной засухи в пахотном и метровом слое почвы разрабатывались с учетом реакции сельскохозяйственных растений на аномалии почвенной влаги и влажности устойчивого завядания. Для оценки почвенных засух по данным гидрометеостанций применялся критерий, используемый Гидрометслужбой России. Согласно этому критерию, «сильную почвенную засуху характеризуют запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы менее 10 мм» (Страшная и др., 2011). Повторяемость засух по декадам была рассчитана по данным наблюдений за запасами продуктивной влаги в слое почвы 0-20 см под яровыми зерновыми культурами по 19 гидрометеостанциям сети Росгидромет, находящихся на территории исследования (табл.).

**Таблица.** Повторяемость засух в пахотном слое под яровой пшеницей, определенная на основе оценки влажности почвы менее 10 мм (I), а также менее 10% персентиля (II), в мае-июне в период 1981-2000 гг. (i) и 2001-2020 гг. (ii) по данным гидрометеостанций сети Росгидромет, а также изменение ее повторяемости в период 2001-2020 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. (iii).

№ п.п.	Характеристики станций (название, №, географические координаты, областная принадлежность)	I			II		
		i	ii	iii	i	ii	iii
1	Мраково, 28928 (52.72° с.ш., 56.62° в.д.), Республика Башкортостан	0	0	0	1	3	2
2	Беляевка, 35125 (51.39° с.ш., 56.42° в.д.), Оренбургская область	2	1	2	3	1	2
3	Бугуруслан, 28806 (53.62° с.ш., 52.42° в.д.), Оренбургская область	1	1	0	1	3	2
4	Большая Глушица, 35001 (52.39° с.ш., 50.47° в.д.), Самарская область	0	1	1	2	2	0
5	Палласовка, 34373 (50.05° с.ш., 46.88° в.д.), Волгоградская область	0	3	3*	0	4	4*
6	Инза, 27872 (53.85° с.ш., 46.35° в.д.), Ульяновская область	0	0	0	3	1	2
7	Элиста АМСГ, 34 861 (46.31° с.ш., 44.26° в.д.), Республика Калмыкия	8	6	2	3	1	2
8	Белинский, 27955 (52.97° с.ш., 43.42° в.д.), Пензенская область	0	2	2	2	2	0
9	Дивное, 34 858 (45.9° с.ш., 43.35° в.д.), Ставропольский край	0	3	3*	1	4	3*
10	Урюпинск, 34 240 (50.79° с.ш., 42.01° в.д.), Волгоградская область	2	3	1	2	2	0
11	Городовики, 34 845 (46.13° с.ш., 41.96° в.д.), Республика Калмыкия	7	5	2	3	1	2
12	Морозовск, 34 545 (48.35° с.ш., 41.83° в.д.), Ростовская область	3	2	4	2	2	0
13	Изобильный, 34 945 (45.37° с.ш., 41.71° в.д.), Ставропольский край	11	1	-10*	4	0	4*
14	Калач, 34247 (50.42° с.ш., 41.05° в.д.), Воронежская область	2	4	2	2	2	0
15	Анна, 34238 (51.48° с.ш., 40.42° в.д.), Воронежская область	0	0	0	1	3	2
16	Чертково, 34 432 (49.38° с.ш., 40.15° в.д.), Ростовская область	2	6	4*	1	4	3*
17	Л. Толстой, 27923 (53.21° с.ш., 39.44° в.д.), Липецкая область	0	0	0	0	4	4*
18	Тим, 34112 (51.62° с.ш., 37.13° в.д.), Курская область	1	0	2	3	1	2
19	Рыльск, 33166 (51.55° с.ш., 34.68° в.д.), Курская область	0	0	0	1	3	2

**Примечания к таблице:** градациями темного – красного цвета показано увеличение повторяемости засух, штриховка – зеленого – ее уменьшения; \* – статистически значимые изменения.

За последнее время был осуществлен значительный прогресс в моделировании влажности почвы с использованием микроволновых измерений. Надежность микроволновых данных подтверждается применением в деятельности отечественной Гидрометслужбы результатов моделирования относительной влажности верхнего слоя почвы, восстановленных по данным радиометра ASCAT спутников MetOp. Вместе с тем результаты восстановления почвенной влажности на больших глубинах с использованием микроволновых данных дистанционного зондирования все еще нуждаются в усовершенствовании. Для анализа характеристик почвенных засух в данной работе, к исследованию были привлечены суточные и среднемесячные данные об объемной влажности почвы (англ. «soil moisture», далее – SM), полученные из находящегося в открытом доступе глобального архива GLEAM (2024). Архив данных влажности почвы в поверхностном (0-10 см) слое ( $m^3/m^3$ ) создан на основе многослойной амстердамской модели GLEAM (версия 3.7) глобального испарения с поверхности (Martens et al., 2017). GLEAM моделирует инфильтрацию атмосферных осадков через вертикальный профиль почвы, используя комбинированные пассивные и активные микроволновые измерения SM ESA-CCI пространственного разрешения  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , полученные с нескольких европейских спутников (SMOS, MetOp и другие; Gruber et al., 2019).

Разнообразие типов растительности в ячейках регулярной сетки архива данных объемной влажности почвы обусловило использование критерия для определения засух по спутниковым данным, который ориентирован не только на сельскохозяйственные культуры. Поскольку сильные почвенные засухи относятся к экстремальным событиям, то для их определения по спутниковым данным был использован критерий, предложенный группой экспертов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (или IPCC) для расчета ряда экстремальных климатических индексов (Zhang et al., 2011). Согласно этому критерию, в данной работе под сильными почвенными

засухами в поверхностном слое почвы понимаются случаи наблюдения экстремально низкой влажности почвы SM, – ниже значения 10% персентилиа за каждый месяц в период 1981-2020 гг. для каждой ячейки сетки архива данных. Выделенные таким образом засухи свидетельствуют об экстремальном дефиците влаги в поверхностном слое почвы на основе оценки влажности почвы, характерной для данной местности.

В качестве характеристик засух в рассмотрение принимались их площадь, интенсивность и продолжительность на территории в период 1981-2020 гг. Площадь засухи по спутниковым данным определялась как процент числа узлов сетки на исследуемой территории со значениями SM, удовлетворяющими описанному критерию, а интенсивность засухи – как их средние значения. Продолжительность засухи была рассчитана как наибольший период (в днях) с экстремально низкой влажностью почвы в поверхностном слое, превысивший 10 дней. Площадь, интенсивность и продолжительность засухи проанализированы в период с мая по июнь, т.е. в наиболее важный для вегетации растений временной интервал. Изменения повторяемости засух исследованы в среднем за период 2001-2020 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. Выбор периодов продиктован ограничением доступного временного интервала спутниковых измерений. Статистическая значимость различий повторяемости засух оценивалась на основе хи-квадрат статистики.

С помощью преобразования значений наблюдений за запасами продуктивной влаги в слое почвы в объемную влажность почвы (%) с использованием констант влажности устойчивого завядания и объемной массы почв, характерных для региона расположения станции (Агрохимическая, 1963), было выполнено сопоставление абсолютных значений почвенной влажности по спутниковым и наземным данным (по узлам, ближайшим к гидрометеостанциям). Обнаружено, что абсолютные значения влажности почвы в поверхностном слое по спутниковым данным воспроизводятся с минимальными искажениями по сравнению с фактическими данными влагозапасов в пахотном слое.

Оценка реакции фотосинтетически активной фитомассы на аномалии условий увлажнения выполнена по нормализованному индексу растительности NDVI, который показывает устойчивую корреляцию с продуктивностью биомассы для различных типов экосистем (Титкова и др., 2020). Данные NDVI получены с помощью модели MOD13C2 версии 061 для среднемесячных значений с разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (Earthdata, 2024). Аномалии вегетационного индекса в годы масштабных весенних засух в мае и июне рассчитывались относительно периода 2001-2020 гг.

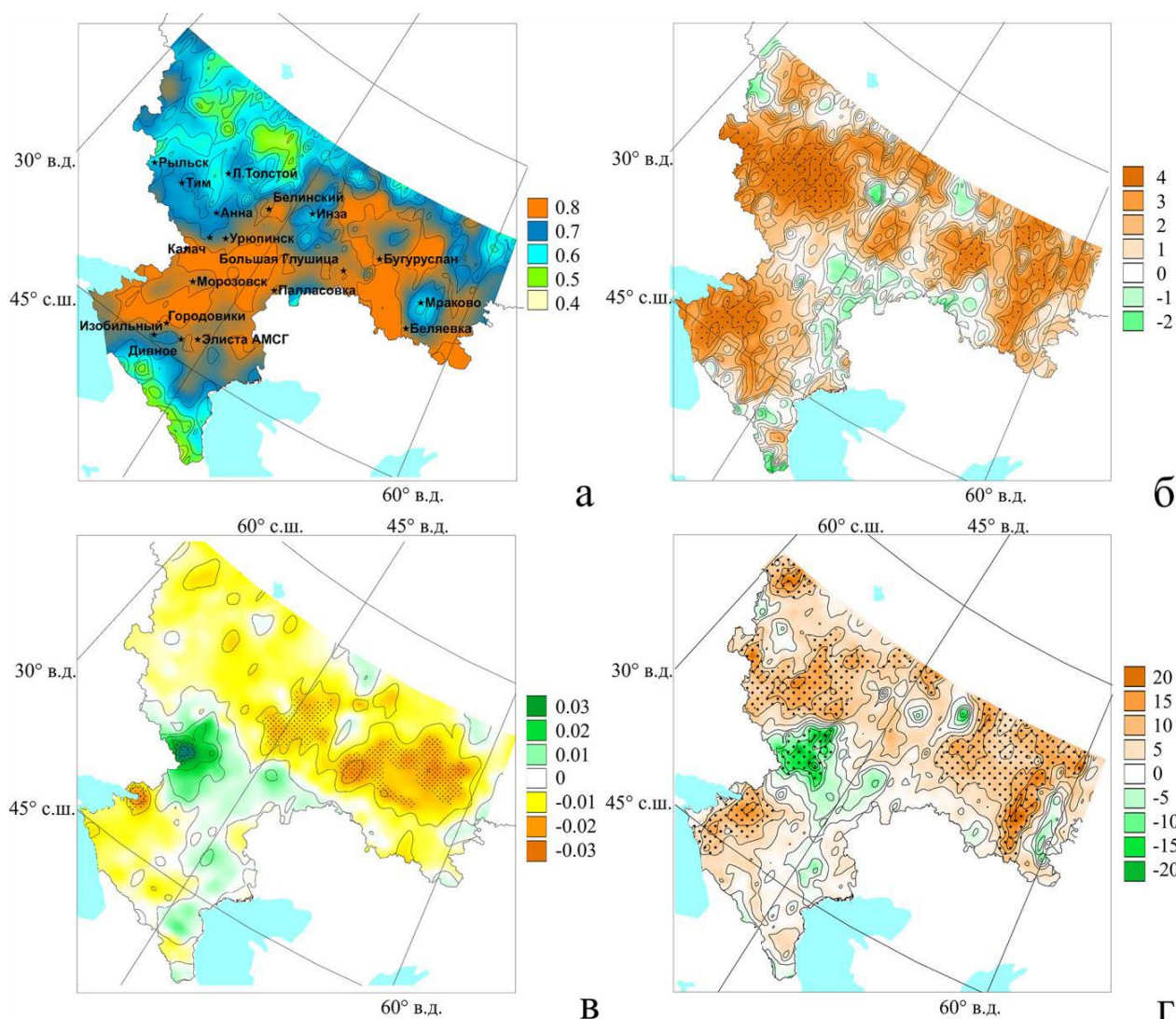
Дополнительно для оценки связи между почвенным и атмосферным увлажнением были привлечены данные стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации (англ. «Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index», далее – SPEI), который характеризует разности атмосферных осадков и испаряемости с учетом транспирации. Тем самым учитывается как приходная, так и расходная составляющая водного баланса. В общемировой гидрометеорологической практике этот индекс используется для выявления атмосферных засух/переувлажнения. С другой стороны, индекс SPEI может быть использован в качестве показателя, описывающего вариации атмосферного увлажнения. Значения индекса SPEI разного временного масштаба: 1, 2 и 3-месячного за весенние и летние месяцы были вычислены с помощью инструментария Пиренейского института экологии (исп. «Instituto Pirenaico de Ecologia»; Vicente-Serrano et al., 2010). При этом были использованы среднемесячные данные об осадках и эвапотранспирации из глобального архива данных CRU TS-4.06, полученного с помощью интерполяции станционных данных в регулярную сетку пространственного разрешения  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (Harris et al., 2020). Подробно методика расчета индекса SPEI изложена нами в более ранней статье (Черенкова, 2023).

### Результаты и обсуждение

*Связь почвенного и атмосферного увлажнения.* Анализ результатов корреляционного анализа временных рядов SM GLEAM и индекса SPEI указывают на достаточно тесную связь рассмотренных спутниковых данных влажности почвы в поверхностном слое глубиной 10 см с изменениями атмосферного увлажнения. Наибольший отклик влажности почвы в мае-июне наблюдался на изменения атмосферного увлажнения в апреле-июне. Наиболее тесная связь между атмосферным и почвенным увлажнением в период 1981-2020 гг. прослеживалась на юге ЕЧР, а также в Поволжье и Заволжье (рис. 1а).

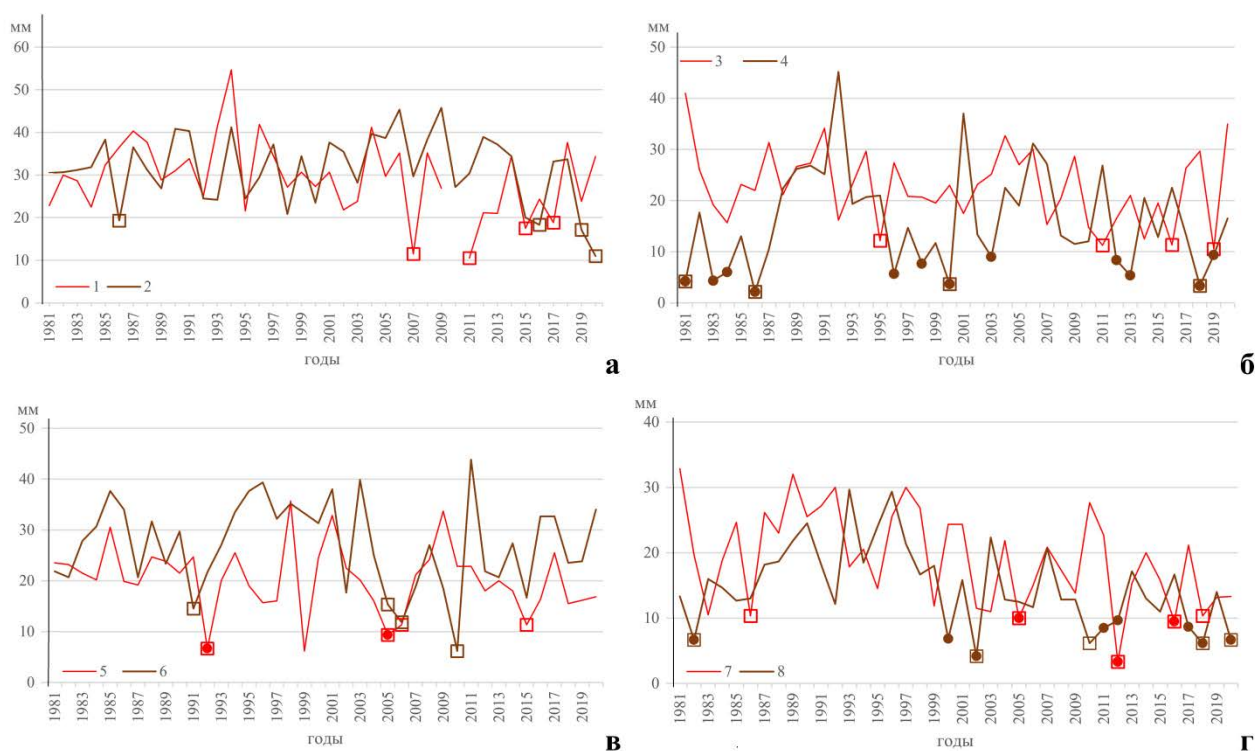
*Изменения повторяемости почвенных засух.* Как видно на рисунке 1б, согласно спутниковым

данным, на территории исследования в период 2001-2020 гг. по сравнению с предыдущим двадцатилетием преобладало увеличение повторяемости сильных засух в поверхностном слое почвы, обусловленных экстремальным дефицитом влаги. При этом наибольшие статистически значимые негативные изменения повторяемости засух проявились в крупных регионах исследуемой территории: в Центральном Черноземье, Поволжье, Заволжье, а также в Приазовье и на Черноморском побережье. В перечисленных районах стало наблюдаться на четыре засухи больше в мае-июне в период 2001-2020 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. (рис. 1б). Увеличение повторяемости засух происходило на фоне снижения влаги поверхностного слоя почвы в период 2001-2010 гг., наибольшего и статистически значимого на территории лесостепей и степей Среднего Поволжья и Высокого Заволжья (рис. 1в). Наиболее существенно продолжительность засух в мае-июне за последние двадцать лет выросла: на 15-20 дней в Среднем Поволжье, на 15-25 дней в северной части Центрального Черноземья, на 20-30 дней в Заволжье, на 20 дней в Приазовье и на Черноморском побережье (рис. 1г). В то же время, значимое сокращение продолжительности засух наблюдалось на юге Центрального Черноземья (в среднем на 20 дней).



**Рис. 1.** Пространственная корреляция между экстремально низкой влажностью почв (SM) в мае-июне и 3-месячным стандартизированным индексом осадков и эвапотранспирации (SPEI) в июне в 1981-2020 гг. Изменения характеристик в поверхностном слое почвы по данным SM в мае-июне в 2001-2020 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. а) засух, б) повторяемости (число случаев/20 лет), в) интенсивности ( $m^2/m^2$ ), г) продолжительности (дни). Условные обозначения: звездочки – гидрометеостанции, точки – области статистически значимых изменений.

Следует отметить, что применение рассмотренных критериев для определения почвенных засух в пахотном слое закономерно приводит к различиям в выявленной повторяемости засух на станциях (рис. 2а-2г). Принимая во внимание уменьшение почвенных влагозапасов на ЕЧР в направлении с севера на юг, ожидаемо, что максимальное число засух, определенных по влагозапасам ниже 10 мм, было зафиксировано станциями на территории Ростовской области, Ставропольского края и Республики Калмыкия (табл.).



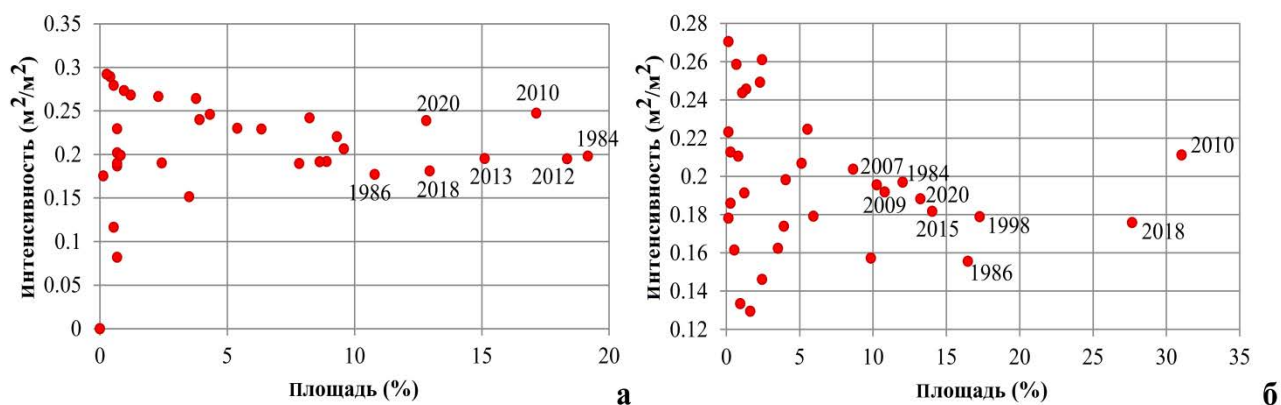
**Рис. 2.** Многолетние почвенные влагозапасы в пахотном слое под яровой пшеницей (мм) в мае-июне в период 1981-2020 гг. на станциях: а – Л. Толстой (1) и Рыльск (2), б – Анна (3) и Городовиковск (4), в – Бугуруслан (5) и Мраково (6), д – Дивное (7) и Чертково (8). Условные обозначения: круги – годы засух с влагозапасами ниже 10 мм, квадраты – годы засух с влагозапасами ниже 10% персентилля.

Направленность изменений влажности почвы, а также повторяемости засух в пахотном слое почвы по станционным данным, выявленных на основе критерия Росгидромета, между декадами в мае-июне за первые двадцать лет текущего столетия по сравнению с предыдущим двадцатилетием демонстрирует существенные временные и пространственные различия. Это вполне ожидаемо на возделываемых сельскохозяйственных полях и связано с тем, что влажность почвы существенно варьирует не только в зависимости от типа культивируемых растений (Страшная, Богомолова, 2005), но также может значительно различаться в пределах одного поля, занятого одной и той же сельскохозяйственной культурой. Также следует принимать во внимание особенности рельефа, различия типов почв, изменчивость ее агрогидрологических свойств и другие факторы.

Как следует из таблицы, об увеличении повторяемости почвенных засух в пахотном слое (влажность в котором не превышала 10 мм), в среднем за май-июнь в период 2001-2020 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. свидетельствуют данные наблюдений на семи станциях. Так увеличение составило: по две засухи за 20 лет в Пензенской и на юге Воронежской области, по четыре засухи за 20 лет на севере Ростовской области, по три засухи за 20 лет на северо-востоке Волгоградской области и на севере Ставропольского края, а также, по одной засухе на северо-западе Волгоградской и на юге Самарской области. В то же время увеличение повторяемости засух в пахотном слое почвы (определенных по экстремальному недостатку влаги ниже 10% персентилля) на четыре засухи за 20 лет наблюдалась на станциях на территории Липецкой области, на две засухи за 20 лет – на

севере Воронежской и западе Курской области, на северо-западе Оренбургской области, на юге Республики Башкортостан, а также на три засухи за 20 лет – на севере Ставропольского края. Это согласуется со значимым ростом повторяемости выделенных по тому же критерию засух в поверхностном слое почвы по данным модели GLEAM (табл.; рис. 16).

Как видно на рисунках 3а и 3б, в первой половине исследуемого периода выделяются две почвенные засухи с охватом 10-20% ЕЧР в мае и июне в 1984 и 1986 гг., а также одна засуха с охватом 17% ЕЧР в июне в 1998 г. Сравнение с каталогом почвенных засух А.И. Страшной для периода 1979-2000 гг. показало, что обширная засуха не только в пахотном, но и в метровом слое почвы под яровыми культурами в течение нескольких декад (со II декады мая по июнь включительно) была зафиксирована в 1984 г. гидрометеостанциями в Курской, Воронежской, Тамбовской, Волгоградской, Ростовской области и Краснодарском крае. В 1986 г. такая засуха зафиксирована в Самарской, Волгоградской, Ростовской области, в Ставропольском и Краснодарском крае (Страшная, Богомолова, 2005). Засуха в 1998 г. была еще более масштабной, наблюдалась с конца мая по 3-тью декаду июня включительно и охватывала Белгородскую, Волгоградскую, Астраханскую, Ростовскую и Оренбургскую область, Ставропольский край, Краснодарский край, Республику Калмыкию (Страшная, Богомолова, 2005). Отметим, что обширная засуха в 1995 г. в пахотном слое почвы, наблюдавшаяся практически весь июнь в Воронежской, Самарской, Волгоградской, Астраханской и Оренбургской областях, в Ставропольском крае, а также в республиках Татарстан и Калмыкия (Страшная, Богомолова, 2005), не была классифицирована по данным SM как наиболее обширная и интенсивная.



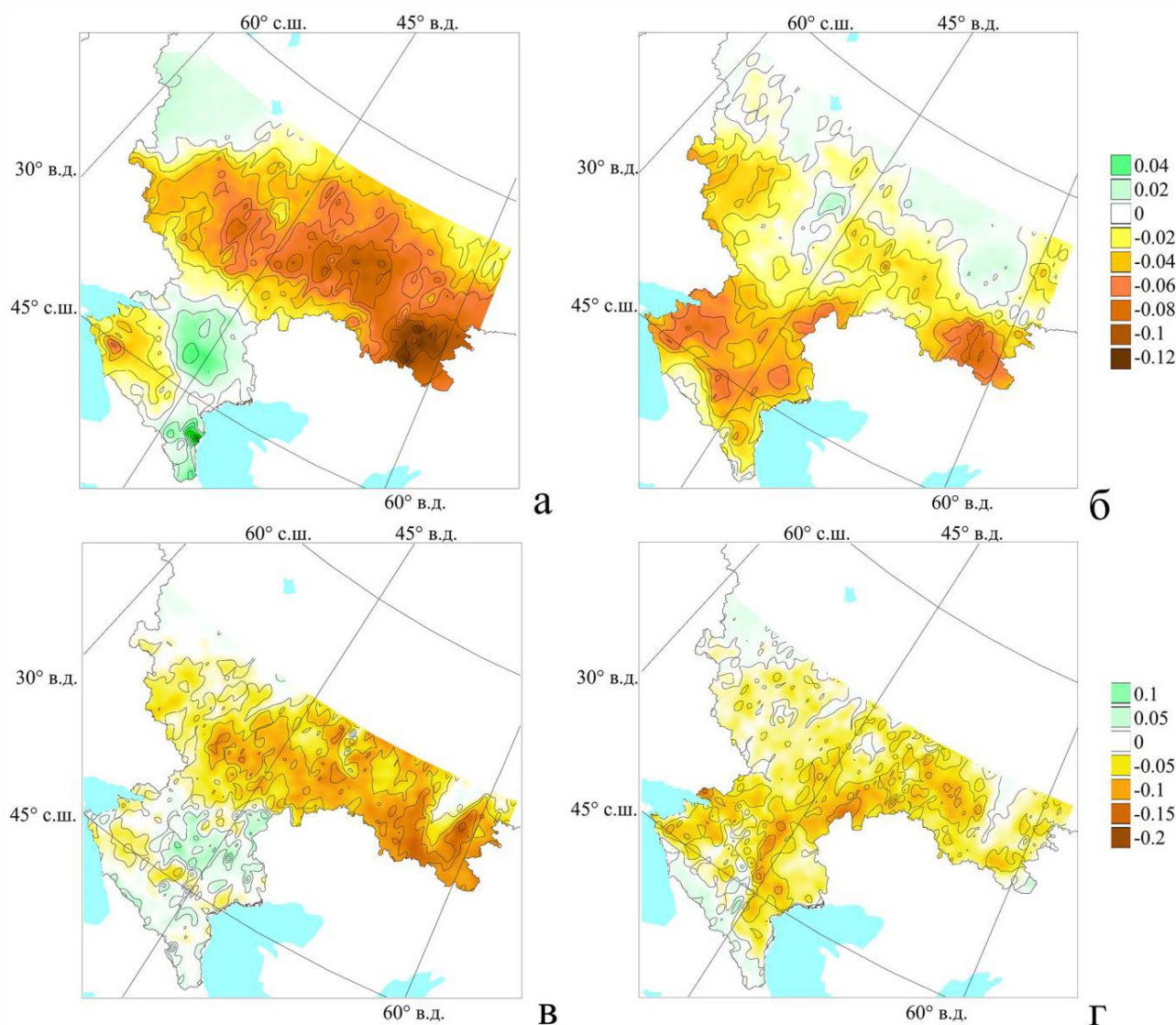
**Рис. 3.** Связь площади (%) и интенсивности ( $\text{м}^2/\text{м}^2$ ) сильных засух в поверхностном слое почвы на ЕЧР южнее  $55^\circ$  с.ш. в мае (а) и июне (б) в период 1981-2020 гг. по данным SM. Засухи с площадью более 10% охвата территории маркированы годами их наблюдения.

На рисунке 3а-б отчетливо прослеживается, что большинство наиболее обширных засух в поверхностном слое почвы в мае и июне на ЕЧР южнее  $55^\circ$  с.ш. отмечалось с начала XXI века. В мае площадь охвата территории засухами в поверхностном слое почвы, выделенных с использованием спутниковых данных согласно приведенному выше достаточно строгому критерию, не превысила 20%. Помимо засух с охватом менее 20% территории исследования, в июне наблюдались две засухи, занимающие 31% территории в 2010 г. и 27% в 2018 г. (рис. 3б). На рисунке 3а-б видно, что засухи в мае были более интенсивными, чем в июне.

*Реакция растительности на почвенные засухи.* Во время почвенной засухи недостаток влаги в растениях обусловлен несоответствием между потребностью растений во влаге и имеющимися ее ресурсами в почве, что приводит к уменьшению транспирации, изменению скорости фотосинтеза и отмиранию корней и листьев. При этом, влияние почвенной засухи на фитомассу ограничено устойчивостью видов растений с глубокой корневой системой. Рост повторяемости почвенных засух при современном глобальном потеплении приводит к утрате биоразнообразия и распространению инвазивных видов (Yunpeng et al., 2018; Hurlburt et al., 2019).

На фоне общего увеличения засушливости на юге ЕЧР в XXI веке годы с сильными почвенными

засухами ярко проявляются среди лет с преобладающим уменьшением фитомассы на территории. Обширная почвенная засуха в 2010 году отразилась на деградации растительности от мая к июню, что в наибольшей степени проявилось в негативном состоянии биомассы в июне в северной части Поволжья, Заволжья и Оренбургской области (рис. 4а-в). В 2018 году весенняя почвенная засуха привела к деградации растительности в Поволжье и Заволжье, Ростовской области, Ставропольском крае (рис. 4б-4г).



**Рис. 4.** Аномалии SM ( $m^2/m^2$ ) в мае (а, б) и безразмерный NDVI (в, г) в июне в годы интенсивных засух: а, в – 2010 г.; б, г – 2018 г.

Полученные результаты согласуются с выводами о наступлении более засушливой фазы атмосферного увлажнения на юге ЕЧР и в Поволжье поздней весной – в начале лета с начала текущего столетия, а также о снижении увлажнения в сезон вегетации за тот же период (Золотокрылин и др., 2013, 2020). В работах М. Hirschi с соавторами (2011) и S.I. Seneviratne с соавторами (2010) было обнаружено, что наблюдаемый дефицит влаги в почве оказывает влияние на развитие волн жары, поскольку низкая влажность почвы снижает испарительное охлаждение и увеличивает поток явного тепла и, следовательно, нагрев атмосферы. Выявленное в данном исследовании увеличение числа случаев сильного иссушения поверхностного слоя почвы в мае-июне с начала XXI века сопровождалось обнаруженным в исследовании Е.А. Черенковой (2023) значимым

ростом повторяемости широкомасштабных атмосферных засух в южной половине ЕЧР в летние месяцы за последние 15 лет. Показано, что этот рост был связан с повышенной повторяемостью антициклонической атмосферной циркуляции над ЕЧР, наблюдавшейся на фоне положительной фазы Атлантической мультideкадной осцилляции (Черенкова, 2023). Результаты выполненного исследования не противоречат современной парадигме, согласно которой регионы с засушливым климатом все больше иссушаются вследствие наблюдаемых в последние десятилетия климатических изменений, а регионы с влажным климатом становятся более влажными (Feng, Zhang, 2015).

### Выводы

В результате проведенного исследования по данным использующей спутниковые измерения модели GLEAM выявлена тесная связь увлажнения поверхностного слоя почвы на ЕЧР южнее 55° с.ш. в мае-июне в период 1981-2020 гг. с атмосферным увлажнением в апреле-июне. Модель GLEAM из-за недостаточного пространственного разрешения модельной сетки не отражает локальные особенности изменчивости почвенной влажности. Результаты восстановленной объемной влажности почвы показывают более сглаженные по пространству повторяемости засух в поверхностном слое по сравнению с засухами в пахотном слое по наблюдениям на гидрометеостанциях.

Согласно спутниковым измерениям, современные изменения характеристик сильных засух в поверхностном слое почвы, обусловленных экстремально низким ее увлажнением, были неблагоприятными на большей части исследуемой территории в начале сезона вегетации. Наибольший статистически значимый рост (на четыре события) повторяемости засух в мае-июне в период 2001-2020 гг. по сравнению с предыдущим двадцатилетием отмечался в Центральном Черноземье, Поволжье-Заволжье, в Приазовье и на Черноморском побережье. В то же время продолжительность засух в мае-июне в тех же районах увеличилась от 15 до 30 дней, что было наибольшим увеличением на территории. Обнаруженный рост повторяемости и продолжительности засух сопровождался увеличением их интенсивности, более значительным в Среднем Поволжье и Высоком Заволжье.

Показано, что результаты выявленной повторяемости засух чувствительны к выбору критерия ее определения. Увеличение повторяемости засух в пахотном слое почвы, выявленных по данным измеренных на станциях влагозапасов ниже 10 мм, в мае-июне в период 2001-2020 гг. по отношению к 1981-2000 гг. наблюдался в Волгоградской, Пензенской, Самарской областях, а также на юге Воронежской и севере Ростовской областей, на севере Ставропольского края. Увеличение повторяемости засух в тот же период, определенных по экстремальному недостатку влаги ниже 10% персентиля на станциях, в целом согласуется с изменениями повторяемости засух в поверхностном слое почвы по данным модели GLEAM в регионах ее значимого роста в Центральном Черноземье, Поволжье и Заволжье.

Установлено, что площадь охвата территории наиболее сильными и обширными засухами в поверхностном слое почвы в мае и июне варьировалась от 10 до 20%. Большинство наиболее сильных обширных почвенных засух отмечалось с начала текущего столетия. Помимо самой сильной июньской засухи с экстремально низкой влажностью в поверхностном слое в 2010 г. с площадью охвата более 30% территории ЕЧР к югу от 55° с.ш., выделяется засуха в 2018 г., наблюдавшаяся на 27% территории.

На фоне общего увеличения засушливости на юге ЕЧР в XXI веке, уменьшение фитомассы в годы с наиболее сильными почвенными засухами наблюдалось на обширной территории, включая степные ландшафты. Рост повторяемости сильных почвенных засух может привести к исчезновению многих степных реликтовых видов растительности и распространению инвазивных видов.

*Благодарности.* Автор благодарит сотрудника Гидрометцентра РФ А.В. Павлову за предоставленные данные.

*Финансирование.* Исследование изменений характеристик почвенных засух проведено при финансовой поддержке проекта № 24-17-00138 Российского научного фонда; связь изменений почвенного и атмосферного увлажнения исследована в рамках госзадания № FMWS-2022-0001

Института географии РАН «Пространственные и временные проблемы устойчивого землепользования в контексте глобальных изменений климата», а отклик растительного компонента на почвенные засухи – в рамках темы № РАН FMWS-2024-0001 (АААА-А19-1021051403088-5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агрохимическая характеристика почв СССР (районы Центральной черноземной полосы и Молдавский ССР). 1963. М.: Изд-во АН СССР. 264 с.
- Береза О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. 2015. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 12. № 1. С. 18-30.
- Володин Е.М. 2011. О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры / Ред. Н.П. Шакина. М.: Триада ЛТД. С. 48-57.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. 2013. Тенденции увлажнения зернового пояса России в начале XXI века // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. С. 251-264.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. 2022. Роль весенне-летних засух в динамике аридизации засушливых земель Европейской территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. Т. 86. № 1. С. 98-108.
- Павлова В.Н., Каланка П., Караченкова А.А. 2020. Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия // Метеорология и гидрология. № 1. С. 78-94.
- Страшная А.И., Богомолова Н.А. 2005. О каталоге сильных почвенных засух под ранними яровыми зерновыми культурами в Черноземной зоне России // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Вып. 340. С. 35-47.
- 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.
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. 2020. Спектральный портрет равнинных ландшафтов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 17. № 3. С. 117-126.
- Фролов А.В., Страшная А.И. 2011. О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур / Ред. Н.П. Шакина. М.: Триада ЛТД. С. 22-31.
- Хлебникова Е.И., Павлова Т.В., Сперанская Н.А. 2012. Глава 4: Засухи // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет. С. 126-164.
- Хомякова Т.В., Зоидзе Е.К. 2002. Агроклиматическая оценка почвенных засух на европейской территории России (по наземным данным) // Метеорология и гидрология. № 9. С. 75-86.
- Черенкова Е.А. 2023. Роль изменений атмосферной циркуляции в увеличении повторяемости летних засух на европейской части России // Метеорология и гидрология. № 9. С. 43-60.
- Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Золотокрылин А.Н. 2015. Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов и ее связь с урожайностью на Европейской территории России // Метеорология и гидрология. № 3. С. 23-35.
- Черенкова Е.А., Семенов В.А. 2021. Новый подход к выявлению влияния экстремальности климата на снижение урожайности пшеницы на юге Европейской территории России // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. Т. 500. № 1. С. 88-94.
- Earthdata. 2024. MOD13C2 v061. MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05 Deg CMG [Электронный ресурс <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v061> (дата обращения 3.09.2024)].
- Feng H., Zhang M. 2016. Global Land Moisture Trends: Drier in Dry and Wetter in Wet over Land // Scientific Reports. Vol. 5. No. 18018.
- GLEAM. 2024 [Электронный ресурс <https://www.gleam.eu/> (дата обращения 03.09.24)].
- Gruber A., Scanlon T., van der Schalie R., Wagner W., Dorigo W. 2019. Evolution of the ESA CCI Soil Moisture Climate Data Records and Their Underlying Merging Methodology // Earth System Science Data. Vol. 11. P. 717-739.
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. 2020. Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset // Scientific Data. Vol. 7. 109 p.
- Hirschi M., Seneviratne S.I., Alexandrov V., Boberg F., Boroneant C., Christensen O.B., Formayer H., Orłowsky B., Stepanek P. 2011. Observational Evidence for Soil-Moisture Impact on Hot Extremes in Southeastern Europe // Nature Geoscience. Vol. 4. P. 17-21.
- Hurlbert M., Krishnaswamy J., Davin E., Johnson F.X., Mena C.F., Morton J., Myeong S., Viner D., Warner K., Wreford A., Zakiideen S., Zommers Z. 2019. Risk Management and Decision making in Relation to Sustainable Development // Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land

- Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems / Eds. P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley. P. 673-800.
- IPCC. 2021. Summary for Policymakers // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. P. 3-32.
- Liu Y., Su X., Shrestha N., Xu X., Wang S., Li Y., Wang Q., Sandanov D., Wang Z. 2019. Effects of Contemporary Environment and Quaternary Climate Change on Drylands Plant Diversity Differ between Growth Forms // *Ecography*. Vol. 42. P. 334-345.
- Martens B., Miralles D.G., Lievens H., van der Schalie R., de Jeu R.A.M., Fernández-Prieto D., Beck H.E., Dorigo W.A., Verhoest N.E.C. 2017. GLEAM v3: Satellite-Based Land Evaporation and Root-Zone Soil Moisture // *Geoscientific Model Development*. Vol. 10. P. 1903-1925.
- Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J. 2010. Investigating Soil Moisture–Climate Interactions in a Changing Climate: A Review // *Earth-Science Reviews*. Vol. 99. P. 125-161.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. 2010. A Multi-Scalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *Journal of Climate*. Vol. 23. P. 1696-1718.
- Zhang X., Alexander L., Hegerl G.C., Jones P., Klein Tank A., Peterson T.C., Trewin B., Zwiers F.W. 2011. Indices for Monitoring Changes in Extremes Based on Daily Temperature and Precipitation Data // *WIREs Climate Change*. Vol. 2. P. 851-870.

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ИТЕРАЦИИ СРЕДНИХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОПУЛЯЦИЙ

© 2024 г. Ю.И. Сухоруких, С.Г. Биганова

*Майкопский государственный технологический университет*

*Россия, 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, д. 191. E-mail: drsuchor@rambler.ru*

Поступила в редакцию 22.02.2024. После доработки 01.05.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Рассмотрены особенности метода итерации средних при изучении популяций, количественные показатели которых имеют различное статистическое распределение. Исследования проводились в центральной части Северо-Западного Кавказа. Использовались авторские литературные и полевые данные по 8 пробным площадям, заложенным в нижнегорной, лесостепной и степной зонах центральной части региона, где для 7 видов растений изучали различные показатели. Численность выборки на пробных площадях – 122-485 особей. Статистическую обработку данных осуществляли с использованием программ Stadia 8.0 и Microsoft Excel для Windows. Значения межитерационных средних, градации устанавливали по известным и авторским методикам. Выявлено, что при нормальном статистическом распределении межитерационные средние имеют близкие (отличие – 0-4.23%) значения с величинами средних, увеличенных на 0.5-2 среднеквадратических отклонения. Для корректировки крайних межитерационных значений, где выборка незначительная (1-4 наблюдения), рекомендовано применение моделей прогноза, которые следует вычислять отдельно для каждого варианта. Выделение градаций количественных признаков в популяциях методом итерации средних обеспечивает адекватное распределение показателей в 3, 5 градациях по сравнению с методами, ориентированными на среднее, увеличенное на значение среднеквадратического отклонения или деления показателей на равные величины.

*Ключевые слова:* итерация средних, межитерационные средние, метод, популяции, градации, статистическое распределение, прогноз, модели.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-32-38**

**EDN: ZLRBAI**

Изучение популяций, а также отбор на этой основе наиболее приспособленных к конкретным условиям организмов, что особенно актуально для аридных экосистем, в значительной степени связано с количественными признаками и их делением на определенные градации (Сингх, Самант, 2020; Крючков, Стольников, 2018). При этом используются различные методические разработки. В их выборе при специальных требованиях исследователь использует строго определенные методы (Злобин, 2009; Методы ..., 2015; Приказ ..., 2016), а при отсутствии действует согласно собственным предпочтениям, исходя из наличия общепринятых или оригинальных авторских методов (Биганова и др., 2022; Zuhua et al., 2022; Hudson et al., 2023). Использование различных методических подходов является важным требованием при прогнозном мультимоделировании (Parrish et al., 2012; Hudson et al., 2023; Cameron et al., 2022). В зависимости от целей и задач значительная часть методик как при изучении популяций, так и при отборе перспективных высокопродуктивных особей использует трех- или пятибалльные градации. Выделяются они на основе различных подходов, среди которых важное место занимает метод равного значения градаций (Биганова и др., 2013; Программа ..., 1999; Приказ ..., 2016; Методы ..., 2015) или величины среднего, увеличенного (уменьшенного) на несколько значений среднеквадратического отклонения (Царев и др., 2010). Имеются и другие подходы, к числу которых относится метод итерации средних, который обеспечивает выделение требуемой совокупности объектов независимо от статистического распределения изучаемых признаков (Сухоруких, Биганова, 2023). Он использует принцип универсальности среднего (Шмойлова и др., 2004), особенности среднего квадратического отклонения как меры изменчивости признаков (Лакин, 1990)

и межитерационных средних как элемента обобщенной модели. В литературе дается только одно сообщение о его применении для выделения перспективного генофонда. Другие особенности метода не исследованы. Учитывая значимость представления об особенностях различных методических разработок для популяционных исследований (Злобин, 2009; Методы ..., 2015), выделения нужного генофонда для повышения продуктивности ландшафтов (Приказ ..., 2016; Крючков, Стольников, 2018; Kryuchkov, 2023), создания моделей прогноза (Parrish et al., 2012; Cameron et al., 2022) особенности приведенного выше метода требуют отдельного исследования.

Цель настоящей работы – выявить особенности метода итерации средних при изучении и делении на градации количественных показателей популяций. Для решения поставленной цели решались задачи по вычислению межитерационных средних изучаемых показателей, их сравнение со значениями среднеарифметического, увеличенного (уменьшенного) на 0.5-2.5 среднеквадратического отклонения, вычислялись модели прогноза для корректировки межитерационных средних, осуществлялось деление количественных показателей на равные величины.

### Материалы и методы

Данная работа является продолжением ранее опубликованных авторами исследований. В ней использованы полевые материалы и отдельные предыдущие литературные данные 7 пробных площадей (ПП 1-5, ПП 7, ПП 8) на которых признаки имели нормальное распределение (Сухоруких, Биганова, 2023). Основные показатели вычислены и публикуются впервые. Пробные площади располагались на территории Республики Адыгея и прилегающих районов в различных условиях. В горной лесной зоне на ПП 1 изучали общий балл качества плодов у 485 кустов, на ПП 2 – среднюю массу плодов у 217 растений, на ПП 6 – толщину скорлупы у 138 особей лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.), на ПП 7 – высоту у 167 растений – саженцев ореха грецкого, на ПП 8 – прирост у 163 трехлетних саженцев ореха грецкого. В лесостепной зоне определяли среднюю высоту в полезационных лесных полосах: на ПП 3 – у 124 деревьев ясеня ланцетного (*Fraxinus lanceolata* B.), на ПП 4 – у 122 рамет дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), в степной зоне на ПП 5 – длину окружности ствола на высоте 1.3 м у 159 деревьев ореха черного (*Juglans nigra* L.; Сухоруких, Биганова, 2023). Поскольку в известных методиках при популяционных исследованиях и выделении перспективного генофонда используются различные термины (крупные/мелкие, высокие/низкие) для исключения разночтений при делении совокупностей показателей, мы использовали термин «градация».

Распределение массива данных на 3 градации различными методами указано ниже.

*Метод 1.* Значения устанавливали с учетом среднеарифметического (среднего  $X_{cp.1}$ ), среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ), максимального ( $X_{max}$ ) и минимального ( $X_{min}$ ) значения признака для всего массива (Царев и др., 2010). Градация А (в сторону уменьшения признака) – ( $X_{cp.1} - \sigma$ ;  $X_{min}$ ), градация В (средняя) – ( $X_{cp.1} \pm \sigma$ ), градация С (в сторону увеличения признака) – ( $X_{cp.1} + \sigma$ ;  $X_{max}$ ).

*Метод 2.* Учитывали значения межитерационных средних в сторону увеличения ( $X_{cp.k}$ ); уменьшения признака ( $X_{cp.k}$ ) при шагах итерации (Сухоруких, Биганова, 2023). Градация А – менее ( $(X_{cp.2} + X_{cp.3}) / 2$ ), градация В – ( $(X_{cp.2} + X_{cp.3}) / 2$ ) и ( $(X_{cp.2} + X_{cp.3}) / 2$ ), градация С – более ( $(X_{cp.2} + X_{cp.3}) / 2$ ).

*Метод 3.* Основан на равномерном делении разности минимального и максимального значения показателей на равные величины (R) в градациях (Злобин, 2009; Методы ..., 2015). Для трех градаций разность делится на 3, для пяти – на 5 частей (n),  $R = (X_{max} - X_{min}) / n$ .

При делении на 5 градаций для *метода 1* учитывали изменение средних показателей в популяции в пределах ( $X_{cp.1} \pm \sigma$ ) и особенностей выделения перспективного генофонда, согласно которым его значение должно быть равно или выше ( $X_{cp.1} \pm 2\sigma$ ; Царев и др., 2010). Для *метода 2* средние значения такие же, как и при 3 градациях, а выделяемый перспективный генофонд выше или равен ( $(X_{cp.4} + X_{cp.5}) / 2$ ; Сухоруких, Биганова, 2023). Соответственно, для методов 1 и 2 градации А и С делятся на две части (индексы «а» и «б»).

*Метод 1.* В сторону уменьшения признака, градация Аа – меньше или равно [ $X_{cp.1} - 2\sigma$ ], градация Аб – [меньше  $X_{cp.1} - \sigma$ ; более  $X_{cp.1} - 2\sigma$ ]. В сторону увеличения признака, градация Сб – [более  $X_{cp.1} + \sigma$ ; менее  $X_{cp.1} + 2\sigma$ ], градация Са – равно или больше [ $X_{cp.1} + 2\sigma$ ].

*Метод 2.* В сторону уменьшения признака: градация Аа – меньше или равно [ $(X_{cp.4} + X_{cp.5}) / 2$ ],

градация Ab – более  $[(X_{cp.4}^- + X_{cp.5}^-) / 2]$ ; менее  $[(X_{cp.2}^- + X_{cp.3}^-) / 2]$ . В сторону увеличения признака: градация Cb – более  $[(X_{cp.2} + X_{cp.3}) / 2]$ ; менее  $[(X_{cp.4} + X_{cp.5}) / 2]$ , градация Ca – больше или равно  $[(X_{cp.4} + X_{cp.5}) / 2]$ .

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием программы Stadia 8.0 для Windows и Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

На основе итерации средних были вычислены соответствующие межитерационные средние для ПП 1-5. Их значения представлены в таблице 1.

Как следует из полученных данных (табл. 1), межитерационные средние при увеличении итераций возрастают (уменьшаются) и не превышают величины максимального (минимального) значения признаков. При численности выборки на ПП 3 – 124 и ПП 4 – 122 раметы вычислить среднее для крайней итерации оказалось невозможным, поскольку в этом массиве данных оказалось единственное максимальное значение показателя.

**Таблица 1.** Значения межитерационных средних показателей на ПП 1-5.

ПП	Среднее/ средне- квадрати- ческое отклонение	Межитерационные средние в сторону увеличения/уменьшения значений признака					Max Min
		$(X_{cp.1} + X_{cp.2}) / 2$	$(X_{cp.2} + X_{cp.3}) / 2$	$(X_{cp.3} + X_{cp.4}) / 2$	$(X_{cp.4} + X_{cp.5}) / 2$	$(X_{cp.5} + X_{cp.6}) / 2$	
		$(X_{cp.1}^- + X_{cp.2}^-) / 2$	$(X_{cp.2}^- + X_{cp.3}^-) / 2$	$(X_{cp.3}^- + X_{cp.4}^-) / 2$	$(X_{cp.4}^- + X_{cp.5}^-) / 2$	$(X_{cp.5}^- + X_{cp.6}^-) / 2$	
1	36.30	37.68	40.03	41.80	43.11	43.99	45.36
	3.25	35.08	33.01	31.50	30.18	29.00	27.63
2	1.41	1.57	1.84	2.05	2.21	2.35	2.50
	0.39	1.26	0.99	0.80	0.65	0.52	0.44
3	17.17	17.88	19.11	19.95	20.51	=	21.50
	1.67	16.53	15.37	14.47	13.73	13.21	13.00
4	17.44	18.24	19.59	20.46	21.67	22.00	22.10
	1.95	16.69	15.27	14.05	12.99	–	11.60
5	40.73	43.91	49.53	53.11	57.00	60.38	62.00
	8.11	37.43	31.91	27.67	24.74	22.31	20.00
Номер межитерационных средних ( $I_n$ ) в сторону увеличения / уменьшения значения признака							
	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5	

**Примечания к таблице 1:** столбцы 2, 6, 8 – извлечение из авторской работы (Сухоруких, Биганова, 2023).

Величина среднего, увеличенного (уменьшенного) на 0.5-2.5 среднеквадратического отклонения для ПП 1-5 представлена в таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что расчетные минимальные значения  $X_{cp.1} - 2.5\sigma$  для ПП 2 и 3 равны фактическому минимуму выборок. На ПП 4 расчетное  $X_{cp.1} + 2.5\sigma$  превышает учтенный максимум на 0.86%, что может быть связано с небольшой выборкой – 122 наблюдения или ошибками округления. Остальные расчетные значения не выходят за пределы учтенной максимальной (минимальной) величины показателей, что согласуется с теорией нормального распределения признаков.

На основе данных из таблиц 1 и 2 проведено сравнение межитерационных средних с соответствующими величинами среднего  $X_{cp.1}$ , увеличенного (уменьшенного) на 0.5-2.5  $\sigma$ . Результаты представлены в таблице 3.

Как следует из данных таблицы 3, отличие значений межитерационных средних от  $(X_{cp.1} + X_{cp.2}) / 2$  до  $(X_{cp.4} + X_{cp.5}) / 2$  от соответствующих значений среднего, увеличенного (уменьшенного) на разное число среднеквадратического отклонения по модулю в сторону увеличения показателей изменялось от 0 до 2.76, а в сторону уменьшения – 0.12-4.23%. Это указывает на высокую согласованность методов 1, 2 и возможность использования без корректировки метод 2 для выделения градаций в

данных пределах. Для межитерационных средних  $(X_{cp.5} + X_{cp.6}) / 2$  соответствующее  $2.5\sigma$  отличие составило 0.99-18.39%. Это связано с небольшим количеством особей (2-4 шт.) в данном интервале. Поэтому для выделения данных градаций необходима корректировка значений на основе моделей прогноза, которые вычисляются по имеющимся значениям предшествующих межитерационных средних.

**Таблица 2.** Значения среднего показателей ПП 1-5, увеличенного (уменьшенного) на 0.5-2.5 среднеквадратического отклонения.

ПП	Значения $X_{cp.1}$ , увеличенного / уменьшенного на 0.5-2.5 $\sigma$				
	$\frac{X_{cp.1} + 0.5\sigma}{X_{cp.1} - 0.5\sigma}$	$\frac{X_{cp.1} + \sigma}{X_{cp.1} - \sigma}$	$\frac{X_{cp.1} + 1.5\sigma}{X_{cp.1} - 1.5\sigma}$	$\frac{X_{cp.1} + 2\sigma}{X_{cp.1} - 2\sigma}$	$\frac{X_{cp.1} + 2.5\sigma}{X_{cp.1} - 2.5\sigma}$
1	<u>37.93</u> 34.68	<u>39.55</u> 33.05	<u>41.18</u> 31.43	<u>42.80</u> 29.80	<u>44.43</u> 28.18
2	<u>1.61</u> 1.22	<u>1.80</u> 1.02	<u>2.00</u> 0.83	<u>2.19</u> 0.63	<u>2.39</u> 0.44
3	<u>18.01</u> 16.34	<u>18.84</u> 15.50	<u>19.68</u> 14.67	<u>20.51</u> 13.83	<u>21.35</u> 13.00
4	<u>18.42</u> 16.47	<u>19.39</u> 15.49	<u>20.37</u> 14.52	<u>21.34</u> 13.54	<u>22.29</u> 12.57
5	<u>44.79</u> 36.68	<u>48.84</u> 32.62	<u>52.90</u> 28.57	<u>56.95</u> 24.51	<u>61.01</u> 20.46
Номер среднего $X_{cp.1}$ , увеличенного/уменьшенного на 0.5-2.5 среднеквадратических отклонения					
	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5

**Таблица 3.** Сравнение значений межитерационных средних показателей ПП1-ПП5 с  $X_{cp.1}$ , увеличенным (уменьшенным) на 0.5-2.5 среднеквадратического отклонения.

ПП	Отличия межитерационных средних от среднего, увеличенного / уменьшенного на среднеквадратическое отклонение, %				
	$\frac{S_1^*}{D_1}$	$\frac{S_2}{D_2}$	$\frac{S_3}{D_3}$	$\frac{S_4}{D_4}$	$\frac{S_5}{D_5}$
1	<u>-0.65</u> 1.17	<u>1.21</u> -0.12	<u>1.52</u> 0.24	<u>0.72</u> 1.26	<u>-0.99</u> 2.93
2	<u>-2.18</u> 3.70	<u>2.22</u> -2.94	<u>2.76</u> -3.03	<u>0.90</u> 3.08	<u>-1.47</u> 18.39
3	<u>-0.69</u> 1.19	<u>1.43</u> -0.84	<u>1.40</u> -1.33	<u>0.00</u> -0.73	= 1.65
4	<u>-0.95</u> 1.37	<u>1.03</u> -1.42	<u>0.47</u> -3.20	<u>1.52</u> -4.23	<u>-2.91</u> -
5	<u>-1.95</u> 2.06	<u>1.41</u> -2.18	<u>0.41</u> -3.13	<u>0.09</u> -0.16	<u>-1.03</u> 9.07

**Примечания к таблице 3:** числитель  $S_1^* - ((X_{cp.1} + X_{cp.2}) / 2) / (X_{cp.1} + 0.5\sigma) \dots S_5 - ((X_{cp.5} + X_{cp.6}) / 2) / (X_{cp.1} + 2.5\sigma)$ ; знаменатель  $D_1 - ((X_{cp.1} + X_{cp.2}) / 2) / (X_{cp.1} + 0.5\sigma) \dots D_5 - ((X_{cp.5} + X_{cp.6}) / 2) / (X_{cp.1} + 2.5\sigma)$ .

Вычисленные по ним модели для изучаемых объектов имеют вид.

$$\text{для ПП 1: } y = 1.6543 * I_n + 36.521, R^2 = 0.9964 \quad (1),$$

$$\text{для ПП 2: } y = 0.2 * I_n + 1.42, R^2 = 0.9968 \quad (2),$$

$$\text{для ПП 3: } y = 0.8732 \cdot I_n + 17.191, R^2 = 0.9962 \quad (3),$$

$$\text{для ПП 4: } y = 1.069 \cdot I_n + 17.378, R^2 = 0.9965 \quad (4),$$

$$\text{для ПП 5: } y = 4.118 \cdot I_n + 40.67, R^2 = 0.9971 \quad (5),$$

где  $y$  – значение межитерационных средних,  $I_n$  – номер межитерационной средней.

Вычисленное по моделям для ПП 3 отсутствующее значение  $(X_{\text{ср.5}} + X_{\text{ср.6}}) / 2$  (табл. 1) составило 21.56 м, отличие от расчетного  $X_{\text{ср.1}} + 2.5\sigma$  составило 0.97%; для ПП 4  $(X_{\text{ср.5}} + X_{\text{ср.6}}) / 2 - 12.03$  м, отличие от расчетного  $X_{\text{ср.1}} - 2.5\sigma - 3.73\%$ . Полученные данные указывают на адекватность применения метода прогноза для вычисления отсутствующих данных в крайних градациях.

Попарный статистический анализ коэффициентов наклона прогностических моделей 1-5 не выявил между ними сходства. Это указывает на то, что подобные модели необходимо вычислять отдельно для каждого случая.

Для изучения особенностей метода итерации средних рассмотрено деление различных показателей (ПП 6-8) на 3 и 5 градаций (табл. 4, 5). Данные пробные площади имеют статистическое распределение, отличающееся от нормального и характеризуются следующими статистическими показателями: ПП 6 –  $X_{\text{ср.1}} = 1.26 \pm 0.02$  мм,  $\sigma = 0.24$  мм,  $V = 19.29\%$ ,  $As = 0.19$ ; ПП 7 –  $X_{\text{ср.1}} = 135.75 \pm 3.45$  см,  $\sigma = 44.57$  см,  $V = 32.83\%$ ,  $As = -0.61$ ; ПП 8 –  $X_{\text{ср.1}} = 20.30 \pm 1.31$  см,  $\sigma = 16.68$  см,  $V = 82.15\%$ ,  $As = 1.25$ .

**Таблица 4.** Численность и значения показателей ПП 6-8 при делении на 3 градации.

Метод	Градация А	Градация В	Градация С
<b>Толщина скорлупы орехов лещины обыкновенной (ПП 6)</b>			
1	<u>25</u> $0.92 \pm 0.02$	<u>97</u> $1.28 \pm 0.01$	<u>16</u> $1.69 \pm 0.03$
2	<u>10</u> $0.81 \pm 0.03$	<u>112</u> $1.28 \pm 0.02$	<u>16</u> $1.69 \pm 0.03$
3	<u>49</u> $1.01 \pm 0.02$	<u>73</u> $1.34 \pm 0.01$	<u>16</u> $1.69 \pm 0.03$
<b>Высота 3-летних саженцев ореха грецкого (ПП 7)</b>			
1	<u>33</u> $65.67 \pm 3.43$	<u>106</u> $143.86 \pm 2.55$	<u>28</u> $187.64 \pm 0.81$
2	<u>19</u> $51.53 \pm 3.11$	<u>108</u> $132.0 \pm 2.82$	<u>40</u> $185.05 \pm 0.86$
3	<u>11</u> $42.91 \pm 3.46$	<u>42</u> $89.62 \pm 2.49$	<u>114</u> $161.70 \pm 2.10$
<b>Годовой прирост побегов ореха грецкого (ПП 8)</b>			
1	<u>8</u> $2.88 \pm 0.13$	<u>128</u> $14.95 \pm 0.81$	<u>27</u> $50.85 \pm 2.10$
2	<u>37</u> $5.03 \pm 0.26$	<u>109</u> $19.82 \pm 1.03$	<u>17</u> $56.65 \pm 2.32$
3	<u>117</u> $11.35 \pm 0.59$	<u>37</u> $38.03 \pm 1.21$	<u>9</u> $63.78 \pm 2.53$

Анализ данных из таблиц 4 и 5 показывает, что при делении на 3 градации по методу 1 среднее значение показателей располагается в соответствующей градации В. При этом отклонение среднего в этой градации от среднего для всей выборки возрастало от 1.59 до 26.35% при увеличении асимметрии с 0.19 до 1.25 и коэффициентов вариации в пределах 19.29-82.15%. Это указывает на неустойчивость метода. При делении на 5 градаций возрастание асимметрии и коэффициента вариации на ПП сопровождалось невозможностью выделения некоторых градаций. Так, на ПП 7 при левосторонней асимметрии градация Са отсутствовала и все показатели в сторону увеличения показателя оказались в градации Сб, а расчетное минимальное значение градации Са имело нереальные для данной совокупности значения 224.89 см и более (фактический max – 195 см).

Отсутствие реальных значений наблюдалось и на ПП 8 имеющей правостороннюю асимметрию, где расчетное значение для градации 1в составило отрицательную величину -13.06 см и менее. Полученные результаты для метода 1 указывают на его неадекватность при выделении 5 градаций.

**Таблица 5.** Численность и значения показателей ПП 6-8 при делении на 5 градаций.

Метод	Градация Аа	Градация Аб	Градация В	Градация Сб	Градация Са
<b>Толщина скорлупы орехов лещины обыкновенной (ПП 6)</b>					
1	$\frac{3}{0.7 \pm 0}$	$\frac{22}{0.95 \pm 0.02}$	$\frac{97}{1.28 \pm 0.01}$	$\frac{12}{1.63 \pm 0.01}$	$\frac{4}{1.88 \pm 0.05}$
2	$\frac{3}{0.7 \pm 0}$	$\frac{7}{0.86 \pm 0.02}$	$\frac{112}{1.24 \pm 0.02}$	$\frac{14}{1.65 \pm 0.02}$	$\frac{2}{1.95 \pm 0.05}$
3	$\frac{10}{0.81 \pm 0.03}$	$\frac{56}{1.1 \pm 0.01}$	$\frac{43}{1.35 \pm 0.01}$	$\frac{25}{1.56 \pm 0.01}$	$\frac{4}{1.88 \pm 0.05}$
<b>Высота 3-летних саженцев ореха грецкого (ПП 7)</b>					
1	$\frac{7}{36.0 \pm 3.09}$	$\frac{26}{73.65 \pm 2.54}$	$\frac{106}{143.86 \pm 2.55}$	$\frac{28}{187.64 \pm 0.81}$	–
2	$\frac{6}{34.5 \pm 3.19}$	$\frac{13}{59.38 \pm 1.72}$	$\frac{108}{132.0 \pm 2.82}$	$\frac{32}{183.09 \pm 0.73}$	$\frac{8}{192.88 \pm 0.52}$
3	$\frac{11}{42.91 \pm 3.46}$	$\frac{22}{77.05 \pm 2.35}$	$\frac{29}{108.90 \pm 1.87}$	$\frac{42}{144.86 \pm 1.80}$	$\frac{63}{178.75 \pm 1.24}$
<b>Годовой прирост побегов ореха грецкого (ПП 8)</b>					
1	–	$\frac{8}{2.88 \pm 0.13}$	$\frac{128}{14.95 \pm 0.81}$	$\frac{18}{44.39 \pm 1.09}$	$\frac{9}{63.78 \pm 2.53}$
2	$\frac{8}{2.88 \pm 0.13}$	$\frac{29}{5.62 \pm 0.22}$	$\frac{109}{19.82 \pm 1.03}$	$\frac{15}{54.2 \pm 1.77}$	$\frac{2}{75.0 \pm 5.0}$
3	$\frac{94}{8.85 \pm 0.41}$	$\frac{35}{24.46 \pm 0.81}$	$\frac{23}{41.0 \pm 1.04}$	$\frac{7}{56.86 \pm 1.53}$	$\frac{4}{70.0 \pm 3.54}$

Метод 2 при увеличении асимметрии и коэффициентов вариации на ПП 6-8 демонстрировал незначительное отклонение среднего градации В от среднего всей выборки в пределах 1.59-2.36%, что указывает на его стабильность. Также во всех случаях он обеспечивал выделение соответствующих градаций.

Метод 3 характеризовался нестабильностью величины среднего выборки при возрастании коэффициента вариации и асимметрии. При выделении 3 градаций на ПП 6 среднее градации В отличалась от среднего выборки на 6.35%, на ПП 7 – 51.47%, но данные находились в соответствующей градации В. На ПП 8 среднее градации В (20.3 см) сместилось в соседнюю градацию А (лимит 28 см и менее). При делении на 5 градаций среднее выборки ПП 6 находилось в соответствующей градации В, но ее среднее отличалось от среднего всей выборки на 6.67%. При возрастании асимметрии и коэффициента вариации на ПП 7, среднее выборки (135.75 см) сместилось в градацию Сб (лимиты 126-160 см), а на ПП 8 среднее выборки (20.3 см) сместилось в сторону меньшей градации Аб (лимиты 17.7-33.2 см). Это указывает на неадекватность метода 3 для выделения 3, 5 градаций при значительной асимметрии и коэффициенте вариации.

Применение методов 1-3 демонстрировало различную численность особей в одинаковых градациях, за исключением случаев на ПП 6, градации С, Аа, Са. Наибольшее отличие численности особей наблюдалось на ПП 8, где в градации Аб отличие между методами 2 и 3 составило 11.75 раза.

### Выводы

1. Значения межитерационных средних не превышают максимальные (минимальные) величины в изучаемых совокупностях.

2. При нормальном статистическом распределении межитерационные средние в сравнении со средним арифметическим, увеличенным (уменьшенным) на 0.5-2.5 среднеквадратического отклонения имеют близкие значения показателей.

3. Модели прогноза для определения значений межитерационных средних необходимо вычислять отдельно для каждого массива данных.

4. При выделении градаций, отбора по значениям требуемых объектов в популяциях, у которых статистическое распределение показателей отличается от нормального, использование метода итерации средних дает более адекватные результаты по сравнению с методами, ориентированными на среднеарифметическое, увеличенное (уменьшенное) на значения среднеквадратического отклонения или деления показателей на равные части изучаемой совокупности.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FZRG-2024-0012 Фундаментальные закономерности фиторазнообразия и экологических особенностей горных лесов юга России).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И., Кулик К.Н., Кулик А.К.* 2022. Морфологические показатели крон лещины в горных лесах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. № 2 (386). С. 59-72.
- Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И., Исуцева Т.А.* 2013. Изменчивость показателей качества плодов лещины обыкновенной в зависимости от условий произрастания // Новые технологии. № 1. С. 59-65.
- Злобин Ю.А.* 2009. Популяционная экология растений: современное состояние, точки роста. Сумы: Университетская книга. 263 с.
- Крючков К.Н., Стольников А.С.* 2018. Стратегия сортового семеноводства для искусственного лесоразведения в экстремально засушливых условиях // Научно-агрономический журнал. № 2 (103). С. 48-50.
- Лакин Г.Ф.* 1990. Биометрия. Учебное пособие для биологических спецвузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 352 с.
- Методы изучения ценопопуляций цветковых растений. 2015. Учебно-методическое пособие для магистров биологического факультета / Сост. А.С. Кашин, Т.А. Крицкая, Н.А. Петрова, И.В. Шилова. Саратов: Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. 127 с.
- Приказ Министерства природы России от 20.10.2015 № 438 «Об утверждении Правил создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов)». Зарегистрировано в Минюсте России 12.02.2016, № 41078.
- Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. 1999 / Ред. Е.Н. Седов, Т.П. Огольцова. Орёл: Изд-во ВНИИ селекции плодовых культур. 608 с.
- Сингх А., Самант С.С.* 2020. Популяция и структура сообществ *Juniperous polycarpus* K. Koch под влиянием климатических изменений в холодной пустыне Гималаев (Индия) // Аридные экосистемы. Т. 26. № 1 (82). С. 21-32. [*Singh A., Samant S.S.* 2020. Population and Community Structure Pattern of *Juniperous polycarpus* K. Koch with Climate Change Effect in the Cold Desert Trans Himalayan Region, India // *Arid Ecosystems*. Vol. 10. No. 1. P. 17-26.]
- Сухоруких Ю.И., Биганова С.Г.* 2023. Метод итерации средних в экологических исследованиях // Аридные экосистемы. Т. 29. № 3 (96). С. 124-130. [*Sukhorukikh YU.I. Biganova S.G.* 2023. The Method of Iterating Averages in Environmental Studies // *Arid Ecosystems*. Vol. 29. No. 3. P. 124-130.]
- Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В.* 2010. Генетика лесных древесных растений. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Лесное хозяйство и ландшафтное строительство». М.: Изд-во МГУЛ. 385 с.
- Шмойлова Р.А., Минашкин В.Г., Садовникова, Н.А., Шувалова Е.Б.* 2004. Теория статистики. М.: Финансы и статистика. 656 с.
- Cameron D., Hartig F., Minunno F., Van Oijen M., Dietze M.* 2022. Issues in Calibrating Models with Multiple Unbalanced Constraints: the Significance of Systematic Model and Data Errors // *Methods in Ecology and Evolution*. Vol. 13. No. 12. P. 2757-2770.
- Hudson D.W., Hodgson D.J., Cant M.A., Thompson F.J., Delahay R., McDonald R.A., McKinley T.J.* 2023. Importance Sampling and Bayesian Model Comparison in Ecology and Evolution // *Methods in Ecology and Evolution*. No. 14. P. 2994-3006.
- Kryuchkov S.N.* 2023. Breeding Effect of Selection Methods (Population, Seed, and Single-Plant) at Seed Sites of Various Genetic Levels in the Volgograd Region // E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Ensuring the Technological Sovereignty of the Agro-Industrial Complex: Approaches, Problems, Solutions” (ETSAIC2023) / Eds. S.N. Kryuchkov, A.V. Solonkin, A.S. Solomentseva, S.A. Egorov, D.A. Gorbushova. Yekaterinburg. P. 03001.
- Parrish M.A., Moradkhani H., DeChant C.M.* 2012. Toward Reduction of Model Uncertainty: Integration of Bayesian Model Averaging and Data Assimilation // *Water Resources Research*. Vol. 48. P. W03519.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-КАРБОНАТНЫХ ПОЧВ В СУХОСТЕПНОЙ ЗОНЕ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2024 г. И.Н. Горохова\*, Л.А. Тарнопольский\*\*

*\*Почвенный институт им. В.В. Докучаева*

*Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2. E-mail: g-irina14@yandex.ru*

*\*\*Научный геоинформационный центр РАН*

*Россия, 119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, д. 11, а/я 168. E-mail: darlev777@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.04.2024. После доработки 01.06.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Выявлены и картографированы поверхностно-карбонатные почвы в сухостепной зоне Волгоградской области на территории Волго-Донской оросительной системы, протянувшейся вдоль Волго-Донского канала. Участок исследования – опытная станция «Орошаемая» в центре оросительной системы. На примере поля № 28 станции показаны все этапы создания цифровой векторной карты на базе космических изображений высокого разрешения (0.5-0.7 м) со спутника Pleiades (25.04.2020) и полевых исследований 2022-2023 гг. Полевые исследования включали маршрутные работы по определению присутствия карбонатов в поверхностном горизонте почв (по вскипанию от взаимодействия почвы с 10% раствором HCl). Также визуально оценивалась степень (класс) вскипания почв. Первый этап картографирования включал в себя классификацию космического изображения данного поля и построение векторного слоя границы поля. Второй этап включал в себя создание векторного файла карты, состоящей из полигонов разных классов на поле (по преобладающей степени вскипания почв) и подсчет долевого участия разных классов внутри векторизованных полигонов. Для классификации и векторизации полигонов поверхностно-карбонатных почв использовались современные программы (Random Forest, QGIS), показаны последовательность технологических этапов создания карты, используемые алгоритмы и функции. В перспективе предполагается найти зависимость между степенью вскипания почв и количеством карбонатов в поверхностном горизонте почв. В результате решения такой задачи космические материалы и простой, достаточно оперативный способ полевого определения поверхностно-карбонатных почв позволят выйти на количественные показатели содержания карбонатов в пахотном горизонте. Созданная карта отражает масштаб антропогенного воздействия на почвы и помогает определить необходимые мелиоративные мероприятия по улучшению их состояния.

*Ключевые слова:* карбонаты в почвах, космические снимки, полевые маршруты, классификация космического изображения, векторизация полигонов.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-39-47**

**EDN: UZGOVZ**

Одной из особенностей почвообразования в аридных и семиаридных условиях является аккумуляция в почвенной толще карбонатов кальция ( $\text{CaCO}_3$ ). В таких руководствах по описанию почв, как «Calcareous Soils» (1972) и «Soil Survey Investigations for Irrigation» (1979), отмечается, что карбонаты наряду с положительным влиянием на свойства почвы (например, способствование образованию стабильных крупнопористых агрегатов), создают и проблемы для сельского хозяйства. Это особенно характерно для орошаемых почв. Так, при высыхании карбонатных почв после поливов или дождей на их поверхности образуется плотная корка, препятствующая просачиванию влаги и прорастанию посевов (Kadry, 1973; Dixon, 2009). Другие авторы, напротив, отмечают положительное влияние карбонатов в почвах, например, на произрастание оливковых растений в прибрежных средиземноморских засоленных землях (Larbi et al., 2017).

Все пути поступления карбонатов в почвы условно можно разделить на две группы: 1) формирование карбонатов непосредственно в почве, 2) поступление их извне.

В первом случае синтез карбонатов происходит в процессе выветривания содержащих кальций минералов. Второй путь поступления карбонатов в почвы – перемещение продуктов выветривания карбонатных пород. В зависимости от климатических условий и способа переноса источниками карбонатов могут быть атмосферные осадки, пыль, грунтовые и поверхностные воды (Розанов, 1992; Глазовская, 2002; Dohrenwend et al., 1989; Gustavson et al., 1991). Особая роль в поступлении карбонатов в почвы и их дальнейшей динамике принадлежит растениям и животным (Глазовская, 2002; Amit, Harrison, 1995).

В разных зонах и регионах мира существуют свои доминирующие условия поступления и накопления карбонатов. Так, в России высокое содержание карбонатов в корнеобитаемом слое свойственно каштановым почвам, карбонатным черноземам и особенно почвам, сформированным на продуктах выветривания известняков и мергелей. Глубина расположения карбонатного горизонта варьирует от 25 до 60 см. Однако в процессе сельскохозяйственного освоения земель карбонаты существенно подтягиваются к поверхности.

Процесс ирригационного окарбонирования поверхностных горизонтов почв в сухостепной зоне России многие годы исследовался В.А. Барановской и В.И. Азовцевым (1972, 1981). Присутствие карбонатов в поверхностных горизонтах пахотных почв в этой же зоне отмечалось и другими учеными (Любимова, Дегтярева, 2000; Любимова, Новикова, 2016, Горохова, Панкова, 2017; Горохова и др., 2018). Было установлено, что значительное поступление карбонатного материала в поверхностные горизонты происходит при распашке и орошении земель: за счет планировки полей при строительстве оросительных систем, подтягивания с почвенными растворами растениями, ирригационной эрозии.

Таким образом, причины появления и механизмы распределения карбонатов в почвах зависят от их наличия в почвообразующих породах, зонального и регионального характера почвообразовательных процессов, антропогенного воздействия на почвы и типа использования земель, поэтому изучение карбонатных почв должно проводиться с учетом особенностей каждой территории.

Карбонатность – важная характеристика почв. Обнаружить и ориентировочно установить содержание карбонатов в полевых условиях можно по выделению углекислого газа (вскипанию) после взаимодействия почвы с 10% раствором HCl (Guidelines for Soil Description, 2006; Руководство по описанию почв, 2012). Поскольку вскипание почв с поверхности в условиях орошения свидетельствует как о наличии карбонатов, так и о значительном антропогенном воздействии на почву, то цель данной работы – построить цифровую векторную карту для определения поверхностно-карбонатных почв по материалам космических съемок и данным полевых исследований и установления масштаба антропогенного преобразования почвы.

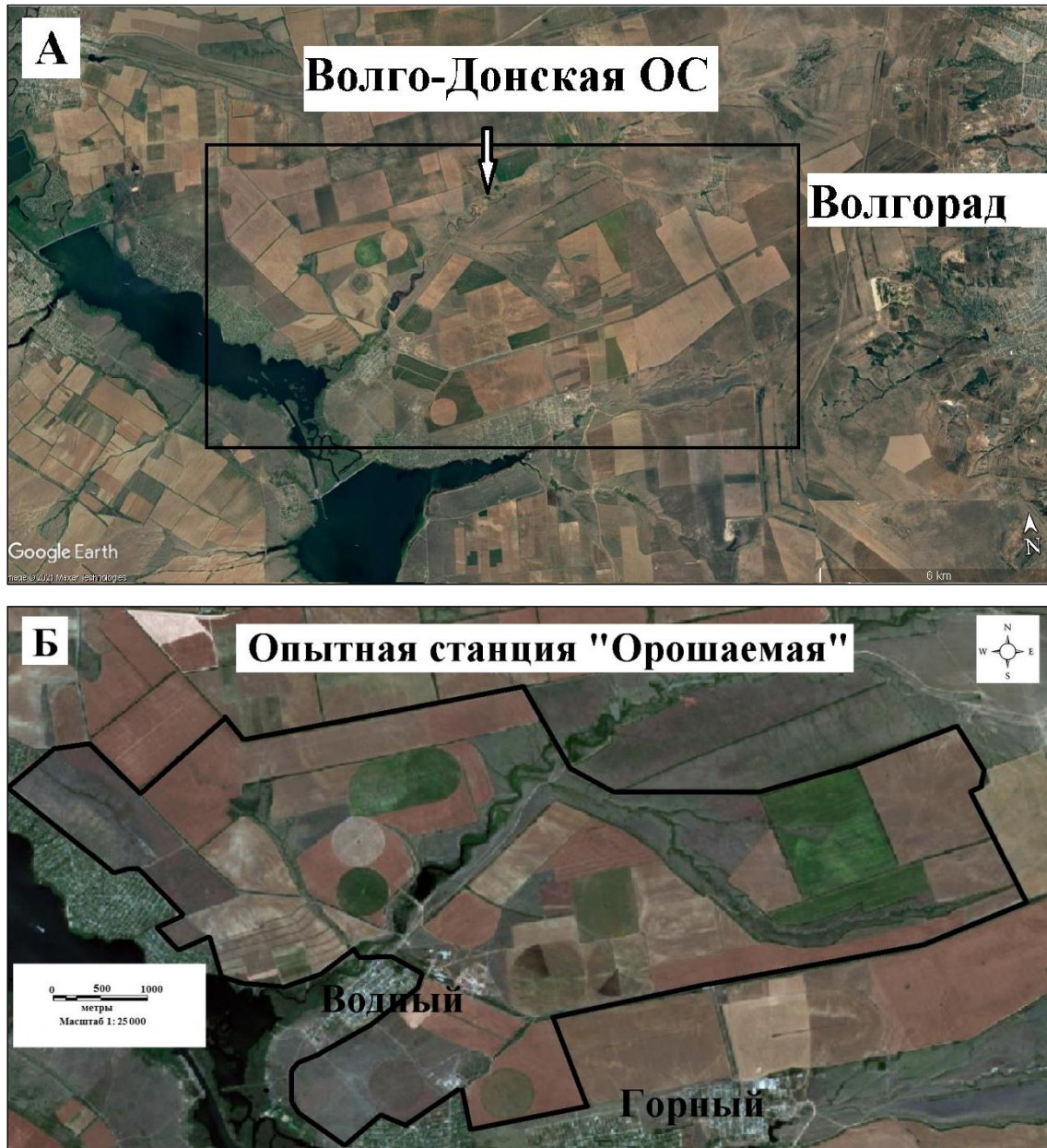
### Материалы и методы

Объектом исследования стала Волго-Донская оросительная система, расположенная в сухостепной зоне Волгоградской области, на юге Приволжской возвышенности. Вдоль этой системы проходит Волго-Донской канал. Картографирование почв проводили в границах опытной станции «Орошаемая», занимающей центральную часть оросительной системы (рис. 1).

Приволжская возвышенность, на которой находится опытная станция, представляет собой плато (130-170 м н.у.м. БС), рассеченное многочисленными речными долинами, оврагами и балками. Водосборные пространства здесь имеют слабовыпуклую форму и постепенно переходят в склоны долин. Формирование рельефа возвышенности происходило как под воздействием интенсивного проявления новейших тектонических поднятий, так и эрозионных процессов.

Юг Приволжской возвышенности входит в подзону каштановых почв. Почвенный покров представлен почвенными комбинациями, включающими светло-каштановые несолонцеватые почвы на водосборных пространствах, светло-каштановые солонцовые комплексы с разным долевым участием солонцов в автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных условиях, сочетания и пятнистости лугово-каштановых, луговых почв разной степени засоления и солонцеватости, аллювиальные почвы в долинах рек (Дегтярева, Жулидова, 1970; Зинченко и др., 2020).

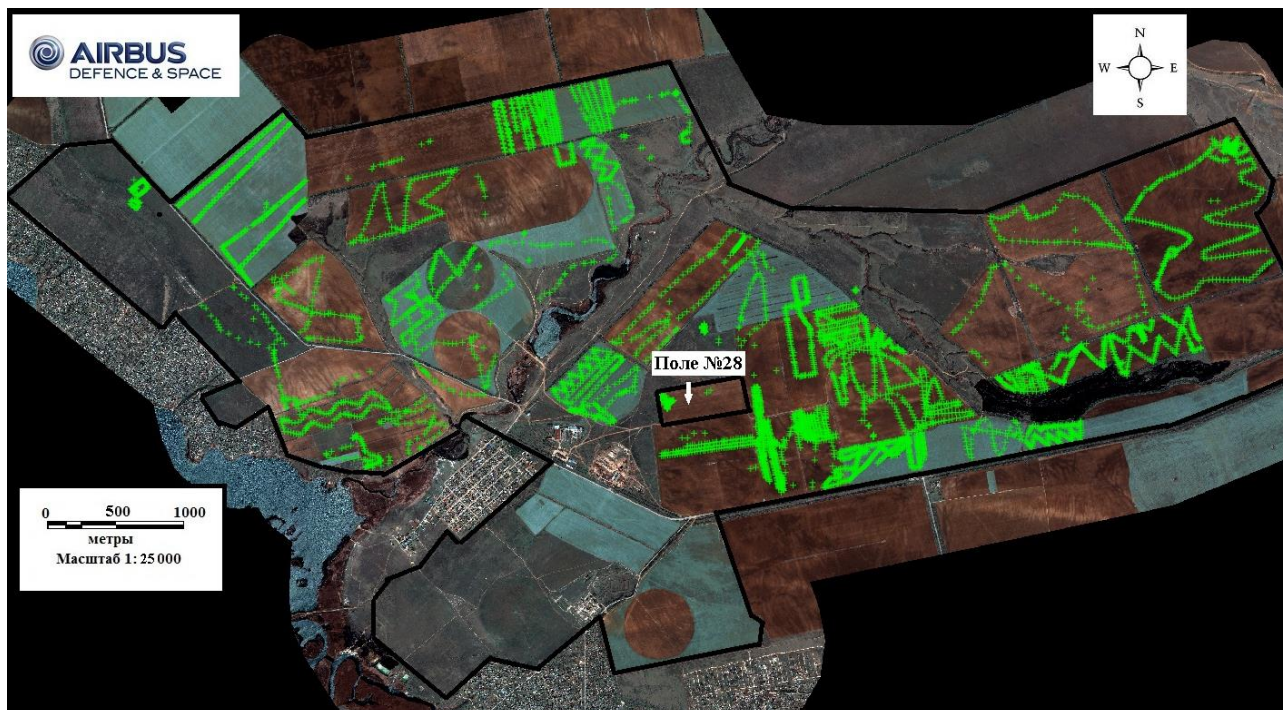
Орошение на опытной станции производится из Береславского и Варваровского водохранилищ, которые входят в систему Волго-Донского судоходного канала им. В.И. Ленина.



**Рис. 1.** А) Расположение Волго-Донской оросительной системы на космическом снимке Google.Earth (Pleiades, 25.05.2021), Б) территория опытной станции «Орошаемая» на космическом снимке со спутника Sentinel-2 (28.06.2020).

Полевые обследования опытной станции «Орошаемая» Волго-Донской оросительной системы проводили в августе-сентябре 2022-2023 гг. (рис. 2). В полевых условиях для определения присутствия карбонатов визуально оценивалась степень вскипания почв по следующей градации (классам): 1 – вскипание отсутствует, 2 – слабое, 3 – среднее, 4 – сильное и очень сильное.

Вскипание определялось с поверхности почвы, с расстоянием между точками 10-15 м. Прокладывались произвольные маршруты, пересекающие поле, в зависимости от обстановки. Далее в камеральных условиях осуществлялось выявление связи между спектральной яркостью в разных каналах (B1-B4) космического снимка Pleiades (25.04.2020) и степенью вскипания почв в точках опробования. Установив такую зависимость для каждого орошаемого поля (точность классификации которых составила от 0.75 до 0.95), была проведена классификация снимка с использованием алгоритма Random Forest. После классификации космического изображения строилась цифровая векторная карта поверхностно-вскипаяющих почв.

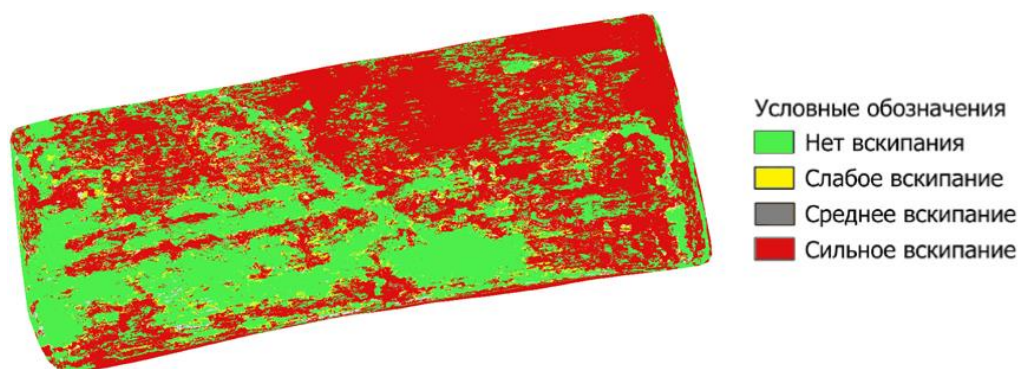


**Рис. 2.** Точки почвенного опробования (2022-2023 гг.) на вскипание почв с поверхности от 10% раствора HCl, отображенные на космическом снимке со спутника Pleiades (25.04.2020).

### Результаты и обсуждение

Создание карты поверхностно-карбонатных почв рассматривается на примере одного из полей № 28. Поле прошло следующие этапы использования: 1975-1990 – богара, 1990-2007 – орошение, 2008-2023 – богара. В течение этого периода почвенный покров подвергся преобразованию под влиянием орошения и сопутствующих агротехнических и мелиоративных воздействий, что отразилось на значительном количестве карбонатов, депонируемых в верхних горизонтах почв. Работа по созданию карты проводилась в два этапа.

Первый этап включал в себя классификацию космического изображения данного поля с использованием алгоритма Random Forest и построение векторного слоя границы поля. Результат классификации представлен на рисунке 3.



**Рис. 3.** Классифицированное изображение поверхностно-карбонатных почв по степени (классу) вскипания, вырезанное по границам поля № 28.

Статистические показатели и матрица ошибок классифицированного изображения почв поля № 28 с использованием алгоритма RandomForest по космическому снимку Pleiades (25.04.2020) (контрольная выборка) представлены в таблице 1 и на рисунке 4. Точность классификации по тестовому набору данных (30% от общего набора) составила 0.83.

**Таблица 1.** Статистические показатели классификации изображения почв (4 класса) с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades (25.04.2020) (контрольная выборка).

Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – нет вскипания	0.90	0.91	0.91	857
2 – слабое вскипание	0.62	0.52	0.57	171
3 – среднее вскипание	0.55	0.44	0.49	81
4 – сильное и очень сильное вскипание	0.82	0.86	0.84	592
Доля правильных ответов	–	–	0.83	1701
Макроусреднение	0.72	0.69	0.70	1701
Среднее арифметическое взвешенное	0.83	0.83	0.83	1701



**Рис. 4.** Матрица ошибок классифицированного изображения почв (4 класса) поля № 28.

По классифицированному изображению после векторизации границы поля были произведены расчеты. В таблице 2 показаны площадь поля ( $m^2$ ), доля выделенных классов на поле, ошибка векторизации.

Второй этап включал в себя создание векторного файла, состоящего из полигонов разных классов на поле (по преобладающей степени вскипания почв), и подсчет долевого участия разных классов внутри векторизованных полигонов.

**Таблица 2.** Площадь поля № 28 и доля выделенных классов.

№ поля	Площадь поля, $m^2$	Количество классов	Класс 1, %	Класс 2, %	Класс 3, %	Класс 4, %	Ошибка векторизации, %
28	252450.110	4	40.21	4.84	1.62	53.33	0.01

Для этого первоначально проводилась генерализация классифицированного изображения с помощью функции отсеивания (англ. «sieve») в программном продукте QGIS. Данная функция удаляет растровые полигоны размером меньше заданного порогового значения (в пикселях) и заменяет значения пикселей в этих полигонах значениями самого большого (по площади) соседнего полигона. Также был подобран вариант связности, поскольку существуют разные возможности соединения и разделения растровых полигонов. При генерализации мы опробовали различные

пороговые значения (от 50 до 5000) с различными вариантами связности. В итоге был отобран файл с порогом 2000 и связностью на основе окрестности фон Неймана I порядка (в виде креста  $2 \times 2$  пикселя).

После создания генерализованного изображения мы провели векторизацию внутри поля с помощью автоматизированной векторизации в программе QGIS командой «создание полигонов». Затем проводили сглаживание полигонов (дважды) – с помощью алгоритма Snakes с параметрами 0.2, 0.2, 1 и 1, 1, 1 соответственно, где первые две цифры означают коэффициенты сглаживания, а последняя цифра – количество итераций. Ошибка после сглаживания при сравнении с первоначальной векторизацией составила 2%, что допустимо. Проверка геометрии на выявление ошибок, таких как наличие пересечений, дубликатов, дырок и наложений в полигонах, составила 0.

Поскольку полигоны на карте не являются абсолютно однородными и выделялись по преобладающему классу вскипания почв, далее необходимо было вычислить внутреннюю неоднородность.

Для подсчета долевого участия всех классов в векторизованных полигонах мы использовали первоначальное пиксельное классифицированное изображение, полученное на первом этапе, и применили функцию Зональной гистограммы (QGIS), благодаря которой определяются уникальные значения пикселей раstra, попадающих в зоны векторизованных полигонов.

На рисунке 5 представлен фрагмент векторной карты поверхностно-карбонатных почв по степени вскипания на территорию поля № 28 опытной станции «Орошаемая» и привязанная к ней таблица с указанием площади каждого полигона, его класса (степени вскипания) и долевого участия всех классов внутри полигона.



**Рис. 5.** Векторная карта поверхностно-карбонатных почв по степени (классу) вскипания и площади отдельных полигонов ( $m^2$ ) поля № 28. Условные обозначения: 3, 4, 5, 15, 16, 17 – полигоны, которые

попадают в часть таблицы, представленную ниже.

**Продолжение рисунка 5.**

№ полигона	Площадь, м <sup>2</sup>	Класс	% кл.1	% кл.2	% кл.3	% кл.4
1	51.742	1	81.44	0.00	0.07	18.49
2	57.686	1	80.08	0.00	0.06	19.85
3	334.012	4	8.18	8.32	0.98	82.52
4	46.163	2	11.36	88.64	0.00	0.00
5	51.767	4	7.61	4.42	2.19	85.77
6	51.659	4	14.51	15.33	0.00	70.16
7	220.415	4	13.67	8.90	5.43	72.00
8	67.603	4	8.68	4.00	1.19	86.13
9	4041.232	4	12.76	9.37	2.53	75.33
10	51.374	4	22.05	10.07	0.00	67.88
11	37.040	4	18.33	0.00	0.00	81.67
12	106.648	4	12.20	4.25	0.48	83.08
13	236.161	4	5.90	12.49	0.67	80.93
14	70.596	4	6.35	7.71	1.14	84.80
15	43.263	4	9.76	7.01	0.00	83.23
16	81.195	4	14.81	2.90	7.27	75.02
17	57.178	4	13.39	12.43	1.89	72.29
18	60.129	4	13.11	11.84	0.91	74.14
19	49.299	1	75.19	5.52	2.97	16.31
20	67.844	1	80.57	0.00	0.21	19.22
21	124.471	1	79.65	0.00	0.00	20.35
22	394.451	1	75.48	0.00	0.80	23.72
23	60.566	1	76.17	0.00	0.00	23.83
24	405.408	1	82.27	0.00	0.00	17.73
25	723.622	1	81.02	3.67	1.42	13.89
26	73.852	1	74.53	0.00	0.00	25.47
27	68.011	1	73.42	0.00	0.00	26.58
28	43.128	1	76.03	3.73	0.00	20.25
29	255.614	1	76.46	0.00	0.22	23.32
30	37.179	1	75.85	0.00	0.00	24.15
31	141.466	1	79.70	0.00	0.00	20.30
32	42.522	1	77.79	0.00	0.00	22.21
33	46.195	1	80.27	0.00	0.00	19.73
34	122.614	1	86.03	3.28	1.09	9.61
35	82.254	1	80.28	0.00	0.00	19.72
36	44.240	1	81.13	0.00	0.82	18.05
37	402.580	1	79.82	0.01	0.29	19.88
38	70.932	1	79.47	0.00	0.00	20.53
39	37.345	1	81.11	0.59	0.00	18.31
40	153.970	1	81.04	0.00	0.00	18.96
41	114.921	1	78.80	7.17	2.55	11.47
42	99.624	1	78.25	0.00	0.00	21.75
43	81.009	1	93.27	1.51	0.00	5.21
44	54.677	1	74.82	0.00	0.50	24.68
45	40.421	1	78.36	0.00	0.00	21.64

**Рис. 5.** Таблица к векторной карте поверхностно-карбонатных почв по степени (классу) вскипания и площади отдельных полигонов (м<sup>2</sup>) поля № 28.

Анализ всего полученного материала показывает, что большая часть почв поля № 28 состоит из поверхностно-карбонатных почв с сильной степенью вскипания (53.3%), а все карбонатные с поверхности почвы занимают 59.8% поля, т.е. поле было подвержено длительному и сильному антропогенному воздействию, такому как глубокая вспашка, орошение и ирригационная эрозия. Сформировавшиеся поверхностно-карбонатные почвы нуждаются в постоянных мелиорациях:

проведению работ по улучшению структуры почвы путем внесения органических удобрений, разрыхлению корки. Созданная карта помогает определить такие участки, рассчитать необходимое количество удобрений, объем предполагаемых работ.

### Выводы

Цифровая векторная карта поверхностно-карбонатных почв, составленная по материалам космических съемок и данным полевых исследований, необходима для выявления и подсчета площадей деградированных почв и оценки масштаба антропогенного воздействия на почвы. На примере поля № 28 опытной станции «Орошаемая» Волго-Донской оросительной системы в Волгоградской области определены поверхностно-карбонатные почвы, где необходимо проведение таких мелиоративных работ, как улучшение структуры почвы путем внесения органических удобрений или рыхление корки, образующейся на поверхности поля после ливней и поливов.

В статье представлены используемые программы (Random Forest, QGIS), алгоритмы и функции, последовательность технологических этапов создания карты. В перспективе предполагается найти зависимость между степенью вскипания почв и количеством карбонатов в поверхностном горизонте почв. В результате решения данной задачи космические материалы и простой, достаточно оперативный способ полевого определения карбонатных почв (по степени вскипания от взаимодействия почвы с 10% раствором HCl) позволит выйти на количественные показатели содержания карбонатов в пахотном горизонте почв и в перспективе проводить более конкретные мелиоративные мероприятия.

*Финансирование.* Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ ФГБНУ ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева" по проекту № 0439-2022-0009 «Изучить трансформацию, эволюцию и деградацию почвенного покрова агроландшафтов на разных уровнях организации, включая внутриволеву неоднородность, с использованием сочетания наземных обследований и цифровых технологий».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барановская В.А., Азовцев В.И. 1981. Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // Почвоведение. № 10. С. 17-27.
- Барановская В.А., Азовцев В.И. 1972. CaCO<sub>3</sub> и его миграция в орошаемых почвах Заволжья // Совершенствование методов оценки засоленных почв, прогнозирование и предупреждение вторичного засоления. Тезисы всесоюзного совещания, г. Харьков, 23-26 октября 1972 г. М.: Минсельхоз. С. 75-76.
- Глазовская М.А. 2002. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена. 288 с.
- Горохова И.Н., Панкова Е.И. 2017. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // Аридные экосистемы. Т. 23. № 3 (72). С. 44-54. [Gorokhova I.N., Pankova E.I. 2017. The Nature of the Patchiness of Irrigated Soils in the Dry Steppe Zone (on Example of the Svetloyarskaya Irrigation System) // Arid Ecosystems. Vol. 7. No. 3. P. 161-170.]
- Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. 2018. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. № 8. С. 1033-1044. [Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Prokop'eva K.O., Kharlanov V.A. 2018. Soil Cover of the Svetloyarsk Irrigation System after 50 Years of Reclamation Practices // Eurasian Soil Science. Vol. 51. No. 8. P. 965-975.]
- Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. 1970. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное издательство. 319 с.
- Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. 2020. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 104. С. 68-109.
- Любимова И.Н., Дегтярева Е.Т. 2000. Изменение карбонатного профиля почв солонцовых комплексов при агрогенном воздействии // Почвоведение. № 7. С. 855-860. [Lyubimova I.N., Degtyareva E.T. 2000. Changes in the Carbonate Distribution in the Soils of Solonchic Complexes at Agrogenic Impact // Eurasian Soil Science. Vol. 33. No. 7. P. 746-751.]
- Любимова И.Н., Новикова А.Ф. 2016. Влияние различных антропогенных воздействий на изменение почв солонцовых комплексов сухостепной зоны // Почвоведение. № 5. С. 633-643. [Lyubimova I.N., Novikova A.F. 2016. Changes in the Properties of Solonchic Soil Complexes in the Dry Steppe Zone under Anthropogenic Impacts // Eurasian Soil Science. Vol. 49. No. 5. P. 581-590.]

- Розанов А.Б.* 1992. Карбонатизация // Элементарные почвообразовательные процессы: опыт концептуального анализа, характеристика, систематика. М.: Наука. С. 23-25.
- Руководство по описанию почв. 2012. Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций. 101 с.
- Amit R.J., Harrison B.J.* 1995. Biogenic Calcite Horizon Development under Extremely Arid Conditions // Nizzana Sand Dunes, Israel. *Advances in Geocology*. Vol. 28. P. 65-88.
- Calcareous Soils. 1972. *FAO Soils Bulletin* 21. Rome: FAO. 253 p.
- Dixon J.C.* 2009. Aridic Soils, Patterned Ground, and Desert Pavements // *Geomorphology of Desert Environments*. 2<sup>nd</sup> ed. / Eds. A.J. Parsons, A.D. Abrahams. Springer Science+Business Media B.V. P. 101-122.
- Dohrenwend J.C., Bull W.B., Mc Fadden L.D., Smith G.I.* 1991. Quaternary Geology of the Basin and Range Province in California // *Quaternary Non-Glacial Geology: Conterminous United States* / Ed. R.B. Morrison. Vol. K-2. Boulder, CO: Geological Society of America. P. 321-52.
- Gustavson T.C., Baumgardner R.W., Caran S.C., Holliday V.T.* 1991. Quaternary Geology of the Southern Great Plains and an Adjacent Segment of the Rolling Plains // *Quaternary Non-Glacial Geology: Conterminous United States* / Ed. R.B. Morrison. Vol. K-2. Boulder, CO: Geological Society of America. P. 477-501.
- Kadry L.T.* 1973. Distribution of Calcareous Soils in the Near East Region, Their Reclamation and Land Use Measures and Achievements // *FAO/UNDP Regional Seminar on Reclamation and Management of Calcareous Soils*. P. 17-27.
- Larbi A., Kchaou H., Gaaliche B., Gargouri K., Boulal H., Morales F.* 2020. Supplementary Potassium and Calcium Improves Salt Tolerance in Olive Plants // *Scientia Horticult Turae*. Vol. 260. Article No. 108912.
- Soil Survey Investigations for Irrigation. 1979. *FAO Soils Bulletin* 42. Rome: FAO. 188 p.
- Guidelines for Soil Description. 2006. 4<sup>th</sup> ed. Rome: FAO. 98 p.

**О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОГО РЕЖИМА  
ПОЧВ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

© 2024 г. З.Г. Залибеков, Р.А. Магомедов, М.А. Мусаев,  
А.Б. Биарсланов, А.М. Ахмедов, П.Д. Мусалаева

*Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН  
Россия, 367025, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д.75. E-mail: bfdgu@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2023. После доработки 12.06.2024. Принята к публикации 20.08.2024.

В условиях современных природных процессов в аридной зоне ведущая роль принадлежит формированию водного режима почв и водных ресурсов, проведению мероприятий по устранению дефицита почвенной влаги и высокой температуры воздуха. Развитие природной циклической деятельности и изменение соотношения тепла и влаги по отдельным сезонам становятся значительными силами, способными формировать комбинации в условиях опустынивания и аридизации. Параметры создаваемой комбинации почв и водного режима соответствуют требованиям роста и развития отдельных групп эфемерной растительности, определяющей возможности использования биологического потенциала.

Изучение водного режима почв, подверженных опустыниванию и аридной деградации, является важной проблемой, имеющей фундаментальное и прикладное значение. Устойчивое состояние водного режима почв в пустынном и пустынно-степном типах почвообразования сопровождается определенными изменениями в функционировании почв в разные сезоны года. Исследованию сезонных процессов и функций почвенного покрова уделяется недостаточное внимание. При исследовании различных типов почв и процессов аридизации необходимо знание роли комбинаций в показателях водного режима, формирующихся в самые короткие отрезки времени и представляющих непрерывную их сменяемость. Для выяснения этого процесса необходимо проведение исследований периодически возникающих свойств, которые способствуют раскрытию закономерностей изменения соотношения тепла и влаги в периоды с разной продолжительностью и разным количеством осадков. Результаты исследований режима водных свойств почв представляют основу для определения степени аридизации по генетическим признакам почвенного профиля. Главными факторами проявления аридизации являются дефицит влаги и возрастающая роль климатического потепления (Виноградов и др., 1975). Проводимые исследования в этом направлении связаны в основном с разработкой закономерностей влияния факторов почвообразования (климата, почвообразующей породы, растительности, антропогенного фактора) на водный режим почв аридных экосистем. В исследованиях процессов аридной деградации значительное внимание уделяется улучшению водного баланса, посадке защитных лесополос, проведению фитомелиораций, выявлению потенциала растительности кормовых угодий и оптимизации антропогенных воздействий (Лаптев, 1997). Процесс гумификации является фактором, определяющим плодородие почв засушливых регионов и борьбы с опустыниванием, поэтому исследования проблем аридных земель часто ограничиваются определением признаков опустынивания, динамики разложения, уменьшения органического вещества, потери почвенной структуры, элементов плодородия почв и др. Это общепризнанный подход, при котором изучаются и оцениваются процессы деградации и переходные стадии от зональных почв к литогенным органоминеральным образованиям, характерным очагам опустынивания.

*Ключевые слова:* опустынивание, комбинации почв, коэффициент увлажнения, сезонные процессы, параметры гумидного и аридного режимов, годовой цикл, соотношение тепла и влаги, конвергентность.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-48-59**

**EDN: VQZIFF**

Основным условием опустынивания является устойчивый дефицит влаги в почве и высокая температура воздуха. В течение года и в отдельные периоды развития растений критические границы недостатка влаги нарушаются и в естественных условиях возникают стадии с достаточным количеством влаги в почве с формированием благоприятного периода влагообеспеченности для растений. Необходимо найти показатель, который отражает наступление дефицита влаги, отрицательно влияющего на способность обеспечения растений доступной почвенной влагой. Для этого рекомендуется определить водный баланс почвы с количественным выражением его компонентов во времени. При этом возникает задача определения продолжительности периода достаточного увлажнения и температуры почвы, способствующей устранению дефицита влаги. Этот период достоверно коррелирует с интенсивностью поглощения воды, процесс которого получил название – *сосущая сила почвы* (Шишов, Панкова, 2006).

Параметры поглощения влаги почвой и обеспечения запасов доступной почвенной влагой являются основанием для дифференциации периодов, пригодных для выращивания кормовых растений с коротким периодом вегетации. В настоящее время более 1.5 млн. га природных кормовых угодий Западного Прикаспия используются без учета сезонно-функционирующих комбинаций в свойствах почв, где накопление воды почвой происходит в периоды с коэффициентом увлажнения  $K = 0.6 - 0.8$ . Это иллюстрирует целесообразность дальнейшего изучения особенностей водного режима почв, подверженных опустыниванию и аридизации (Бананова, 1987).

Цель работы – выявить основные параметры периода накопления почвенной влаги в зимний, зимне-весенний и осенний сезоны при среднесуточной температуре воздуха выше  $10^{\circ}\text{C}$ . В аридной климатической зоне функционируют временные комбинации разновидностей светло-каштановых, лугово-каштановых почв с благоприятными условиями выращивания культурных растений эфемерового типа развития кормового и продовольственного назначения. Большое значение имеет влияние временных свойств водного режима почв в отрезках с благоприятными агропроизводственными свойствами (Розанов, 1984).

Для достижения поставленной цели ставятся задачи: определить физико-химические и биологические свойства основных типов почв в очагах опустынивания и морфологические признаки корнеобитаемого слоя Рапса озимого, рекомендованного в качестве кормовой культуры в центральной части Терско-Кумской низменности. Особое значение имеет количественная характеристика отчуждаемой части фитомассы в виде урожая и долевого участия годового опада в круговороте органического вещества, выявление различий в параметрах водного режима, сформированных в очагах опустынивания, функционирующих в естественных зональных условиях. Необходимо рассчитать проективное покрытие рапса озимого и глубину проникновения корневой системы растений, провести учет количества дней с полевой влажностью почвы, превышающей наибольшую влагоемкость в слое 0-20 см в течение вегетации растений (Романов, 2022).

### **Материалы и методы исследования**

Объектом исследования являются светло-каштановые карбонатные почвы, распространенные в Центральной части Терско-Кумской низменности (Тарумовский район Республики Дагестан). Характерная особенность почвенного покрова – развитие аридизации, способствующая дегумификации почв, засоление, слабой, средней степени, уплотненность верхней части профиля и формирование в породах среднего и тяжелого гранулометрического состава. Почвы сухого полупустынного климата отличаются укороченным гумусовым профилем, с развитием карбонатного, солонцового горизонтов и формированием под изреженной пустынной, полынно-пустынной растительностью. В современных условиях светло-каштановые почвы подвержены процессам опустынивания, эрозии, солонцеватости и занимают значительную часть территории Прикаспийской низменности (Ташнинова, Ташнинов, 2007).

Рельеф изучаемого участка равнинный, с небольшим уклоном на север и северо-восток. Нарушение равнинной поверхности рельефа связано с воздействием антропогенного фактора и незначительным уклоном на север и северо-восток. Почвообразующие породы представлены древнекаспийскими отложениями средне-легкосуглинистого состава разной степени засоления. Антропогенные воздействия на почвенно-растительный покров сводятся в основном к использованию естественной растительности, в качестве пастбищных угодий. Превышение норм

пастбищных нагрузок, отмечаемое на всей территории региона, способствует изреживанию травостоя, развитию процессов дефляции, засоления и солонцеватости почв (Гасанова, 2004). Преобладающими типами почв являются светло-каштановые слабо-среднезасоленные, занимающие территорию с равнинной поверхностью, и лугово-каштановые, засоленные в разной степени и приуроченные к понижениям рельефа. Территория, где расположены производственные посевы и опытные делянки, до 2023 года выделялась выбитой разреженной растительностью: солянки однолетние, бурачок пустынный, мартук пшеничный, полынь пустынная (Чувашов и др., 2024).

В 2023 году полигон был отведен под опытные поля, очищен от сорняков и подвергнут боронованию и культивации. После предпосевной обработки почвы провели посев рапса озимого с уплотнением катками для повышения противэрозионной устойчивости поверхностных слоев почвы. Динамику влажности изучали методом закладки почвенных разрезов глубиной 1 м с ежемесячным отбором образцов послойно через каждые 10 см. Для интерпретации полученных данных в качестве критерия интенсивности накопления влаги применяли метод учета количества дней с влажностью почвы ниже наименьшей влагоемкости (НВ). Этот показатель достоверно коррелирует с интенсивностью усыхания почвенной массы, уменьшением количества осадков и падением уровня грунтовых вод. Основные свойства почв изучены общепринятыми методами анализов, достоверно отражающими изменение показателей водного режима почв в условиях опустынивания и интенсификации антропогенных воздействий (Кулик, 2000).

### Результаты и их обсуждение

Терско-Кумская низменность относится к зоне полупустынной и пустынной области светло-каштановых и бурых пустынных почв. Её главной особенностью является континентальность и сильная засушливость климата. Период с активной температурой выше 10°C при влажности почвы в пределах, характерных для условий накопления запасов почвенной влаги (ПВ), распадается на две части: первая – зимне-весенняя с накоплением влаги в условиях преобладающей роли нисходящих токов влаги, образуемых атмосферными осадками; вторая – летне-осенний, отрезок времени с физическим испарением, транспирацией с восходящими токами влаги, связанными с повышением температуры при переходе к летнему сезону. Увлажнительный период года, состоящий из двух частей, характеризуется содержанием почвенной влаги в слое 0-20 см в пределах 30-50% от полной полевой влагоемкости (ППВ). Это обеспечивает целевое функционирование почв, исключая засушливые условия, способствующие уменьшению показателей до влажности завядания растений. Формируется экологическое пространство, которое не может быть абстрактным, как утверждает И.А. Соколов (1985). Содержание этого понятия включает совокупность реально существующих в природе комбинаций функционирующих почв в динамике со своими контурами, ареалами. При этом образуются комбинации функционирующих вариантов почв, отличающихся по влажности и запасам продуктивной влаги. Для характеристики почвенных условий региона, где изучаются сезонные изменения в свойствах почв, определена продолжительность в периодах-днях с дефицитом влаги и достаточным объемом почвенной влаги (Ковда, 1978).

В светло-каштановых карбонатных почвах представлен спектр наиболее аридных разностей каштанового типа почвообразования с непромывным типом водного режима. Развитие их протекает в особо отличающихся условиях периодической смены параметров водного режима, способствующего переводу их из одной категории, свойственного засушливому климату с нормой осадков 160-180 мм, в другую, увлажненную, со значительным запасом почвенной влаги. Для характеристики процессов почвообразования периодов иссушения в летний сезон и в увлажнительный осенне-зимний и зимне-весенний сезоны приводятся результаты физико-химических анализов светло-каштановых карбонатных почв, получивших широкое распространение в Терско-Кумской низменности (табл. 1).

Содержание гумуса в поверхностном горизонте составляет 2.3-2.8% и снижается с глубиной под влиянием процессов аридизации и иссушения климата. Это способствует интенсивному разложению растительных остатков и отсутствию признаков образования дернины. Кроме того под воздействием сухого пустынного климата усиливается непромывной водный режим и уменьшается глубина образования карбонатного горизонта. Соответственно, изменяется и растительный покров: степные и лугово-степные сообщества сменяются пустынно-степными группировками с участием видов полыни и галофитов. Вертикальный профиль имеет полноразвитую систему генетических горизонтов

со свойствами, характерными подтиповой классификационной единице каштановых почв сухих степей (Сапанов, Сиземская, 2010).

Важной особенностью светло-каштановых карбонатных почв является выщелоченность легкорастворимых солей, стабильное содержание карбонатов Ca, Mg с уменьшением плотности сложения в нижней половине верхнего метрового слоя. В формировании водного режима определенное значение имеет гранулометрический состав, особенно содержание тонких фракций физической глины (размеры частиц < 0.01 мм), включая илистую фракцию. Содержание этих фракций отличается стабильностью и значительной величиной – 34.85-45.38%. Такое распределение тонких фракций свидетельствует о развитии ресурсоведческого потенциала, обусловленного элементами переменного влажного климата. Реакция почвенного раствора слабощелочная, щелочная, свойственная условиям сухих степей и полупустынь (Алибеков, Алибекова, 2016).

**Таблица 1.** Основные физико-химические свойства светло-каштановых карбонатных почв Терско-Кумской низменности.

Разрез, глубина, см	%				мг/100 г почвы			Ph водный
	гумус, %	сухой остаток	содержание, мм		питательный элемент			
			< 0.01	> 0.01	N	P	K	
<b>2А</b>								
0-10	2.34	2.34	34.85	65.11	6.5	2.0	27.9	8.0
15-25	1.90	1.90	34.46	65.54	4.4	1.4	20.0	8.8
30-40	1.28	1.28	38.07	67.93	1.0	0.5	11.5	8.0
60-70	0.97	0.97	25.41	74.49	0.8	0.4	8.5	8.3
75-85	0.80	0.30	34.46	65.34	0.6	0.1	8.7	7.9
120-130	0.39	0.05	34.46	65.11	0.5	0.1	9.1	7.8
<b>3А</b>								
0-10	2.87	2.05	33.80	66.20	6.0	1.70	26.9	8.1
20-30	1.44	1.44	45.38	55.62	3.9	0.40	24.1	8.6
50-60	1.16	1.16	35.44	64.56	3.4	0.35	19.0	8.3
80-90	0.67	0.45	36.31	63.7	2.5	не опр.	17.0	8.9
110-120	0.84	0.33	42.7	57.3	не опр.	не опр.	10.1	8.7

Относительно плодородия светло-каштановых карбонатных почв следует отметить степень выше средней обеспеченности гидролизуемым азотом (6.0-6.5 мг/100 г), среднюю степень подвижного фосфора (1.7-2.0 мг/100 г) и высокую степень калия (26.9-27.9 мг/100 г). Формирование резервного фонда калийных соединений в повышении плодородия связано с обогащенностью рассматриваемых почв первичными минералами (полевые шпаты, слюда).

Следующим этапом изучения сезонных изменений водного режима почв является определение причин различий в запасах влаги по сезонам года. Особенностью сезонных аккумуляций влаги является просачивание атмосферных осадков из поверхностных горизонтов и их накопление в породе. Это является результатом влияния исходного состояния однородности отложений и усиления нисходящих токов влаги в уплотненной породе. Складываются условия для накопления и аккумуляции гравитационной влаги над глинистыми плотными породами. Формируются сезонные различия накопления воды и изменения водного режима светло-каштановых карбонатных почв. При наличии в толще прослоек тяжелых суглинков и глин накопление замедляется: запасы влаги увлажненного слоя иссушаются и создаются условия для восстановления дефицита влаги (Бабаев, 1979).

Общей особенностью рассматриваемых почв является периодичность динамики накопления влаги в корнеобитаемой толще профиля. После зимнего и ранневесеннего периодов накопления влаги наступает засушливый период (конец апреля – начало мая), когда накопленная влага затрачивается на транспирацию и испарение. Во второй половине мая наступает период иссушения корнеобитаемой толщи после максимального накопления фитомассы. В летние месяцы дефицит

влаги распространяется по всему почвенному профилю. В конце сентября влажность почвы начинает увеличиваться за счет осадков, продолжается вегетация видов полыни и появляются эфемероиды. В ноябре запасы почвенной влаги приближаются к ранневесенним величинам. В октябре завершаются циклические процессы иссушения, наступает период зимнего, зимне-весеннего накопления влаги в корнеобитаемом слое почв. Периоды накопления влаги и радикальных сезонных изменений, формирующихся в водном режиме рассматриваемых почв, представляют основу применения технологий для освоения аридных земель, отличающихся от общепринятых классических методов (Сотин, 2000; Русакова, 2012).

Возникла необходимость определения условий оптимального роста и развития растений: диапазона величины влажности почвы в отрезке времени с температурой выше 10°C в зимне-весенний и осенне-зимний сезоны. Также важно выявление оптимального соотношения тепла и влаги для кормовых культур, рекомендуемых для посева в целях использования ресурсов водного режима почв. Анализ мероприятий и эффективность использования ресурсов водного режима приводятся по Терско-Кумской низменности применительно к кормовой культуре рапса озимого (табл. 2).

**Таблица 2.** Ресурсы сезонных изменений водного режима почв и их использование в мероприятиях по борьбе с опустыниванием.

№	Показатель	Единица измерения	Количество	Воздействие	
				Параметры	Характер влияния
1	Количество дней с температурой > 10°C	дни	112	свойственные полной вегетации	по установленным фазам развития
2	Уменьшение содержание влаги в почве ниже показателя влажности завядания	дни	100-110	развитие растений на фоновом уровне вегетации	способствует развитию растений
3	Продолжительность гумидного периода	дни	64-70	развитие вегетативных органов и накопление фитомассы	формирование сомкнутости проективного покрытия
4	Количество дней с суховеями, сильными ветрами	дни	20-25	продолжительность и скорость ветра	дефляция, дефицит почвенной влаги
5	Продолжительность засушливого периода года	°C	125-141	осенняя, весенняя	рост и развитие растений, накопление фитомассы
6	Максимальная среднесуточная температура почвы	°C	22-24	замедление накопления фитомассы	приближение к показателям влажности завядания
7	Атмосферные осадки за период с температурой > 10°C	мм	60-80	количество	создает оптимальное соотношение тепла и влаги
8	Норма осадков по сезонам года	дни	160-180	замедление динамики накопления фитомассы	Наступление стадии спелости
9	Максимальная температура воздуха	°C	56-58	10-15 дней	стадия летнего анабиоза

Отличия сезонных изменений в водном режиме и запасах почвенной влаги заключаются в длительности периодов увлажнения, которые характеризуются по данным верхней метровой толщи профиля. Для количественного учета определена примерная продолжительность указанных периодов в днях. На первом этапе определена связь между количеством осадков по каждому сезону и показателями режима влажности ВП при выращивании рапса озимого.

В отрезках времени с гумидными условиями сформирована естественная комбинация условий, благоприятствующих расширению площадей, занятых эфемеровой растительностью, кормового и продовольственного использования. Основной задачей является определение закономерностей формирования сезонных изменений и водного потенциала в динамике процессов накопления влаги.

Комбинации условий, способствующих увеличению тепла в поверхностном слое почвы в летний период путем конвенции, приводят к прогреву нижних слоев атмосферы и являются основной причиной формирования высоких температур и сухих воздушных масс. Это изменение характеризует баланс тепла на поверхности почвы и вызывает вторичные процессы аридизации, опустынивания. Кроме того, развитие этого процесса сопровождается дальнейшим сокращением расходов внутреннего тепла почвы, что косвенно ускоряет климатическое потепление (Плотников, 1959). В результате природная среда подвергается усиленному потеплению, и этот результат завершающего этапа проявляется периодически. В результате природная среда и формирующиеся условия приводят к смене стадий аридизации, стабилизации среднегодовой температуры воздуха на фоне уменьшения осадков. Наглядным примером сезонных и межсезонных изменений балансов тепла и влаги является динамика состояния почвенного покрова регионов Прикаспийской низменности, где определена связь между количеством осадков и температурой почвы на глубине 10 см.

Кроме того, выявлена устойчивая связь осадков со всеми показателями влажности ВП в слое 0-50 см и в толще породы до глубины 130 см. Стабильность этих показателей зависит от метеорологических условий, литологии и гранулометрического состава почв и подстилающей породы. Установлено, что период стабильного увлажнения слоя 0-10 см определяется продолжительностью 48-56 дней в зимне-весенний период и 30-35 дней – в осенне-зимний. Уменьшение содержания влаги в слое 0-10 см в конце мая доходит до влажности завядания растений (Шульгин, 1955). Этот фактор имеет значительную силу и является одним из признаков аридизации почв и минерализации органических остатков. Продолжительность периодов с величиной ниже влажности завядания растений составляет 100-110 дней с диапазоном колебания продолжительности до 25%. Отличительным признаком периода со среднесуточной температурой 10-15°C является развитие вегетативных органов и накопление зеленой массы в течение 60-70 дней. Из факторов, определяющих урожайность и формирование общей биомассы растений, следует отметить влияние сильных ураганных ветров, 20-25 дней в году достигающих скорости > 20 м/сек. В первую очередь воздействию ветров подвергаются участки со слабым ростом всходов и низким проективным покрытием (Прудникова, 2024).

На светло-каштановых карбонатных почвах представлен спектр наиболее аридных представителей каштанового типа с непромывным водным режимом. Развитие их протекает в условиях периодической смены параметров водного режима, способствующих переводу естественного и целевого функционирования почв из одной категории в другую. Различия между этими категориями заключаются в формировании режима достаточного увлажнения зимне-весеннего периода с полевой влажностью почвы > 30%, температурой воздуха 15-25°C. Эти параметры увлажненного периода функционируют 60-80 дней с последующим переходом к категории аридного климата с усиленной засушливостью до стадии формирования очагов опустынивания (Агроклиматический справочник ..., 1973).

Отличиями указанных категорий являются: для первой категории увлажнения – нисходящие токи влаги с накоплением в корнеобитаемой толще; для второй – состояние острого недостатка влаги в почве и формированием восходящего тока влаги, связанного с физическим испарением и транспирацией растений.

Режим достаточного увлажнения, свойственный гумидным условиям зимне-весеннего периода, характеризуется полевой влажностью почвы > 25-30%, температурой воздуха 15-25°C. Параметры увлажненного периода функционируют 64-70 дней. После этого срока наступают аридные условия, среднесуточные температуры достигают 25°C, наступает дефицит влаги ниже влажности завядания. Атмосферные осадки за период с температурой > 10°C способствуют сохранению соотношения факторов, продолжительностью которых соответствует требованиям кормовых растений с коротким периодом вегетации. Сезонная норма осадков и изменение водного режима почв закономерно меняются в течение года, оптимальное содержание этой нормы определяется количеством ресурсов, обуславливающих целевое функционирование почв (табл. 3).

**Таблица 3.** Оценка факторов опустынивания и сезонных изменений, обуславливающих целевое функционирование почв.

№	Фактор	Зимне-весенний период			Осенне-зимний период		Примечание
		Единицы измерения	Значение	Количество дней	Значение	Количество дней	
1	Атмосферные осадки	мм	100-120	60-65	94	48-52	преобладают в летний, зимне-весенний периоды
2	Температура воздуха	°С	18-20	54-59	16-20	61-67	отличается стабильностью
3	Температура почвы на глубине 10 см	°С	15-17	60-65	10-15	57-62	
4	Соотношение осадков и температуры почвы	мм/°С	120/14-17	60-65	94-100	54	оптимальные показатели
5	Коэффициент увлажнения	мм	0.8	60-65	0.7	48-56	максимальные показатели
6	Естественная влажность почвы	%	октябрь-ноябрь	20-28	октябрь-ноябрь	35-40	
7	Запасы влаги	т/га	октябрь-ноябрь	20-30	100-200	50-55	

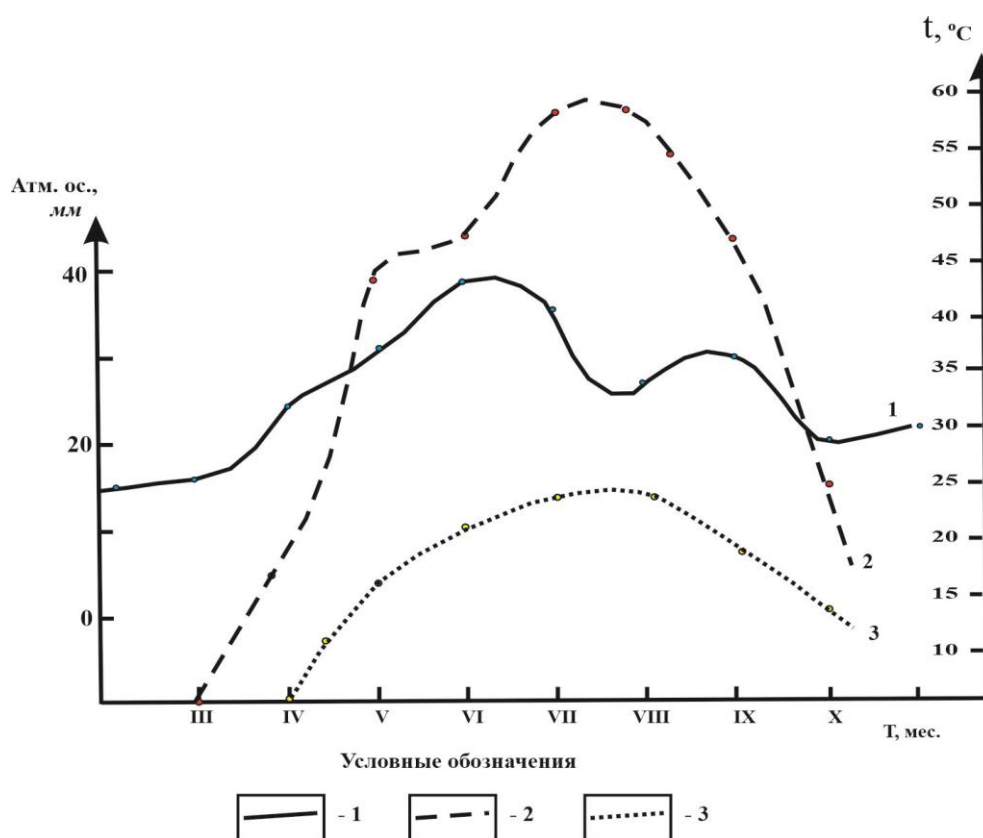
Период дней с осадками и продолжительность повышенного увлажнения в зимне-весенний период составляет 100-120 дней, в осенне-зимний – 48-58 дней. Кроме того, в ранневесенний период увеличение температуры продолжается значительно дольше, способствуя формированию условий, благоприятных для вегетации растений. Заметное влияние оказывают сроки наступления зимнего минимума и абсолютные величины температуры воздуха. Общим для рассматриваемых сезонов является относительно высокая температура верхней метровой толщи профиля и ее постепенное уменьшение в нижележащих слоях. Этот процесс является одним из основных в формировании благоприятных водных свойств почв, сменяемых во времени.

Определяющее значение в формировании и функционировании условий, приемлемых для растений, имеет соотношение величины атмосферных осадков и температуры почвы (Муратчаева, Хабибов, 2004). В период оптимального сочетания тепла и влаги происходит интенсивное и равномерное развитие растений. Соотношение тепла и влаги в почвенной среде существенно отличается по сезонам года от зонального для данной природной среды. Кроме того, процесс сезонной дифференциации характеризуется значительным оборотом влаги, расходом органического вещества и отсутствием тенденции накопления легкорастворимых солей, что свидетельствует об их преобразовании и большом обороте органического вещества (Акимцев, 1957; Залибеков и др., 2020).

Наглядное представление динамики формирования различий, обусловленных качественными изменениями влажности и температуры воздуха почвы, приведено графическим изображением процессов, происходящих в светло-каштановых почвах Терско-Кумской низменности (рис.).

Динамический характер изменения параметров водного режима почвы, определяющий целевое её функционирование, характеризуется радикальным изменением не только свойств, но и ресурсоэкономического потенциала. Оно протекает с равномерным увеличением естественной влажности почв до достижения оптимума в соотношении тепла и влаги. Прогрессирующее движение идет по восходящей линии. С достижением оптимума начинается противоположный процесс – увеличение расходов накопленной влаги с последующим иссушением корнеобитаемого слоя почв (Анциферова, 2022). Запасы влаги уменьшаются, иссушается слой 0-50 см, формируются дефициты

влаги и наступает стадия влажности завядания растений. Плавное равномерное увеличение атмосферных осадков в весенний, весенне-летний периоды продолжаются до июля с максимумом осадков – 120 мм. Продолжительность этого периода составляет 60-65 дней.



**Рис.** Формирование сезонно-климатических изменений, обуславливающих различия в водном режиме аридных почв. Условные обозначения: 1 – атмосферные осадки, мм, 2 – температура воздуха, °C, 3 – температура почвы, °C.

Действие температурного фактора проявляется в прогрессирующей динамике, показатели которого достигают максимума в июле: воздуха – +18-20°C, почвы на глубине 10 см – -15-17°C. Общей особенностью теплового режима воздуха и почвы является одновременное (параллельное) увеличение с небольшим превышением температуры воздуха. Разрыв в величине влажности воздуха и поверхностного слоя почвы в динамике зимне-весеннего и весеннего периодов незначителен. Это указывает на соответствие динамики теплового и водного режимов почв потребностям кормовых растений с коротким периодом вегетации (Панкова, Новикова, 2002). Эффективность воздействия внешних факторов определяется их влиянием на физико-химические, биологические процессы, происходящие в верхнем метровом слое почвы. Установлено, что интенсивность воздействия факторов почвообразования и связанных с ними особенностей структуры и сложения зависят от тепловой энергии и многообразия форм водных ресурсов. Поэтому соотношение тепла и влаги в структуре локальной природной среды регионов существенно отличаются от условий, типичных для данной природной зоны. Этим критерием определяется влияние условий почвообразования на формирование оптимального соотношения тепла и влаги при условии, когда количество атмосферных осадков превышает величину физического испарения. При этом учитывается влияние влажности воздуха, скорости ветра и запасов влаги, образуемых поверхностным стоком. Действия факторов почвообразования в зимний минимум и летний максимум температуры сопровождается уменьшением интенсивности сезонных процессов почвообразования, особенно накопления влаги. Наиболее важный элемент изменяющихся условий по сезонам – соотношение восходящих и нисходящих потоков влаги по почвенному профилю, определяющий тип водного

режима (Шашко, 1959). Если признаки промывного типа водного режима в гумидных условиях аридного климата характеризуют современные почвообразовательные процессы, то для аридных гумидно-увлажненных условий данное явление (преобладание восходящих потоков влаги над нисходящими) характеризует сезонную аномалию от общего фона, обусловленного циклически закономерно повторяющимися изменениями. Преобладание нисходящего потока влаги над восходящим и количества атмосферных осадков над испарением в зимний, зимне-весенний периоды определяют общность гидротермического режима аридных и временно-гумидных условий пустынного климатического режима. Эквивалентный характер объемов воды, мигрирующей в профиле светло-каштановых почв в нисходящих, восходящих направлениях, объясняет однотипность направления почвенных процессов, являющихся значительной силой зональных типов почвообразования (Кулик, 2000).

Разные комбинации почвенных свойств представляют временное гумидное направление и функционируют в рамках времени, ограниченного зимним периодом. Они имеют временный обратимый характер и являются показателем одного из основных признаков общего направления почвообразовательного процесса. Важное значение для оценки аридного почвообразования и агроклиматических показателей почвенного покрова имеет продолжительность времени с суммой среднесуточных температур выше  $10^{\circ}\text{C}$  – 57-62 дня, продолжительность периода (зимне-весеннего, весеннего), условия которого соответствуют требованиям растений с короткой вегетацией, составляет 54-59 дней. Отличительной чертой увлажненного периода являются различия в календарных сроках и динамике изменения влажности почв по сезонам года:

а) период аридного засушливого отрезка времени распадается на 2 части: предзимний и послезимний, прерываясь зимними холодами и летней жарой. Во времени занимает стыковое, межсезонное положение;

б) в условиях достаточного увлажнения почв в отрезках времени между весенними и осенними сезонами общая продолжительность засушливого периода сохраняется в пределах указанных отрезков времени (Залибеков и др., 2019).

На основе анализа приведенного материала выявлена конвергентность (сходство) условий предзимнего и послезимнего межсезонных отличий, формирующихся в водном режиме почв. Сформулирована теоретическая концепция изучения межсезонных различий климата в борьбе с опустыниванием, условий проявления конвергентных аномалий в свойствах почв, функционирующих в периоды недостаточного и достаточного увлажнения. Установленная закономерность сезонных изменений является процессом, распространенным на территории засушливых земель в географическом поясе с коэффициентом увлажнения  $K = 0.3-0.7$ . Конвергентность изменений сезонной внутригодовой продолжительности территорий выступает в качестве универсальной закономерности в экологии почв, подверженных деградации и разрушению. Практическое значение концепции сводится к раскрытию возможностей развития земледельческих отраслей, основанных на использовании климатических ресурсов, недоступных в рамках существующих технологий (Бабаев, 1986).

Сезонные запасы почвенной влаги, миграция воднорастворимых веществ в вертикальном профиле, изменение параметров тепла и влаги в зависимости от гранулометрического состава почвенных горизонтов определяют перспективы создания технологий по борьбе с опустыниванием земель. Для изучения этих процессов и решения задач прикладного значения проанализированы свойства почв, в результате чего выявлены существенные отличия предполагаемой технологии от общепринятых мероприятий. Как указывает С.В. Зонн (1983), при традиционно-экологическом подходе подбираются известные свойства почв с учетом биологических особенностей растений. Такая оценка основывается на качественных показателях, свойственных отдельным сезонам, тогда как для решения фундаментальных вопросов необходима количественная их характеристика (количество атмосферных осадков, температура воздуха, влажность почвы и др.). Учитывая это, мы рассматриваем количественные показатели временно функционирующих комбинаций почв, способных мобилизовать ресурсы, выполняющих функции почв, как среду обитания живых организмов (Соколов, 1985). Временно-обратимым физическим, химическим, биологическим свойствам почв не уделяется внимание, так как в формировании типичных свойств, характерных почвам данной зоны, кратковременные факторы не меняют установленных показателей, на основе

которых строится генетическая классификация. Изучение и оценка временно-функционирующих свойств водного режима и накопления запасов воды различных форм в аридных условиях имеет важное значение в развитии концепции борьбы с опустыниванием.

### Выводы

В разработке проблемы борьбы с опустыниванием и увеличения запасов влаги определены закономерности сезонной динамики накопления и миграции водных потоков в вертикальном профиле почв.

1. Основные факторы опустынивания земель, характеризующиеся дефицитом влаги и высокой температурой, испытывают сезонные (временные) изменения, способствующие формированию комбинаций почв с достаточным количеством тепла и влаги. Функционирование их сопровождается формированием признаков, характерных почвам целевого назначения с определенной продолжительностью. Продолжительность периода целевого функционирования сильно деградированных вариантов аридных почв в Терско-Кумской низменности составляет 60-80 дней.

2. В современных условиях острого недостатка атмосферных осадков и дефицита почвенной влаги проблема увлажнения почв в пределах оптимальной естественной влажности становится чрезвычайно сложной. Поиск водных ресурсов для орошения почв и разработка способов их использования для возрождения почвенно-растительного покрова приобрела глобальное значение. Для решения этой проблемы необходима мобилизация водных ресурсов, образуемых в межсезонные периоды с температурой воздуха и почвы, укладываемые в рамки допустимых величин для прохождения вегетации растений.

3. Основной закономерностью формирования различий в запасах почвенной влаги и оптимального соотношения температуры и влагообеспеченности почв является межсезонная естественная периодичность накопления влаги в осенне-зимний и весенне-летний периоды. Процессы накопления влаги и стабильное увлажнение слоя 0-20 см продолжается в весенний период до наступления влажности завядания растений и формирования отрезка времени, обеспечивающего условия прохождения стадий развития растений с коротким периодом вегетации.

4. Определяющее значение в формировании водного режима, благоприятного для растительности, имеет соотношение величины атмосферных осадков и температуры почвы на глубине 10 см. Период оптимального соотношения тепла и влаги обеспечивает интенсивное развитие растительного покрова, величина которого существенно отличается по степени увлажненности режима, характерного для данной природной зоны. Процесс сезонной дифференциации характеризуется значительным оборотом влаги, расходом органического вещества и отсутствием тенденции накопления легкорастворимых солей. Эти процессы, остающиеся без учета в принятой технологии борьбы с опустыниванием, свидетельствуют о большом обороте органического вещества в сезонных изменениях.

5. Представлена теоретическая концепция изучения межсезонных различий климата с определением условий проявления конвергентных аномалий в свойствах почв разной степени увлажнения. Установленная динамика проявляется на территории засушливых земель с коэффициентом увлажнения  $K = 0.3-0.7$  и раскрывает возможности развития сельскохозяйственных отраслей, недоступных в рамках существующих технологий. Выявленные ресурсы климата и почвенно-растительного покрова представляют основу возрождения деградированных земель аридного климатического пояса.

*Финансирование.* Исследование выполнено в рамках госзадания 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», проект 01-17 «Возрождение земель, подверженных опустыниванию, с применением подземных пресных вод в Терско-Кумской низменности».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агроклиматический справочник по Дагестанской АССР. 1973. Ленинград: Гидрометиздат СССР. 84 с.

- Акимцев В.В.* 1957. Почвы Прикаспийской низменности Кавказа. Ростов-на-Дону: Государственный университет им. В.М. Молотова. 282 с.
- Алибеков Л.А., Алибекова С.Л.* 2016. Природные факторы, способствующие возникновению процесса опустынивания в Средней Азии // Природные и антропогенные изменения аридных экосистем и борьба с опустыниванием. Махачкала. С. 21-25.
- Анциферова О.А.* 2022. Гидрологический режим буроземов в агроландшафтах Самбийской равнины (Калининградская область) // Почвоведение. № 6. С. 713-728.
- Бабаев А.Г.* 1979. Охрана природы Аральского бассейна – проблема государственной важности // Проблемы освоения пустынь. № 2. С. 14-22.
- Бабаев А.Г.* 1986. Стратегия комплексного изучения и освоения пустынь СССР // Проблемы освоения пустынь. № 4. С. 3-12.
- Бананова В.А.* 1987. Методы изучения очагов опустынивания на пастбищах Западного Прикаспия // Проблемы освоения пустынь. № 4. С. 58-62.
- Виноградов Б.В., Фролов В.Р., Снакин В.В.* 1975. Биологические критерии выделения зон экологического бедствия // Известия АН СССР. Серия географическая. № 5. С. 77-89.
- Гасанова З.У.* 2004. К определению оптимальной площади фильтрующей ячейки для аппроксимирования почвенных карт // Почвенные и биологические ресурсы южных регионов России. Махачкала. С. 80-85.
- Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Биарсланов А.Б., Магомедов Р.А., Асгерова Д.Б.* 2019. Об использовании пресных подземных вод засушливых регионов мира в борьбе с опустыниванием земель // Аридные экосистемы. Т. 25. № 3. С. 3-12. [*Zalibekov Z.G., Mamaev S.A., Biarslanov A.B., Magomedov R.A., Asgerova D.B., Galimova U.M.* 2019. The Use of Fresh Groundwater from Arid Regions of the World in the Fight against Land Desertification // *Arid Ecosystems*. Vol. 9. No. 2. P. 77-84.]
- Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Гринченко О.С., Котенко М.Е., Магомедов Р.А.* 2020. О приоритетах развития стратегий исследований засушливых земель мира // Аридные экосистемы. Т. 26. № 3. С. 3-14. [*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.]
- Зонн С.В.* 1983. Современные проблемы генезиса и географии почв. М.: Наука. 180 с.
- Ковда В.А.* 1978. Аридные суши и борьба с засухой. М.: Наука, 128 с.
- Кулик К.Н.* 2000. Оценка, картографирование, мониторинг и прогноз опустынивания // Антропогенная деградация ландшафтов и экологическая безопасность. М.-Волгоград: ЮНЕП/ЦМП/ВНИАЛМИ. С. 135-142.
- Латтев И.П.* 1997. К вопросу о взаимодействии природы и общества // Труды НИИ биологии и биофизики Томского университета. Вып. 3. С. 155-165.
- Муратчаева П.М.-С., Хабибов А.Д.* 2004. Кормовые ресурсы зимних пастбищ Дагестана и тенденции их развития в современных условиях // Почвенные и биологические ресурсы южных регионов России. Махачкала. С. 26-32.
- Панкова Е.И., Новикова А.Ф.* 2002. Карты засоления почв России // Почвоведение. № 7. С. 817-851.
- Плотников М.А.* 1959. Оценка запасов подземных вод. М.: Госгеотехиздат. 112 с.
- Прудникова Т.Н.* 2024. Природная обусловленность древнего земледелия Северо-Западной и Центральной Монголии // Аридные экосистемы. Т. 30. № 1. С. 125-135. [*Prudnikova T.N.* 2024. The Nature-Determined Character of the Early Arable Farming in Northwest and Inner Mongolia // *Arid Ecosystems*. Vol. 14. No. 1. P. 106-115.]
- Розанов Б.Г.* 1984. Аридизация суши и антропогенное опустынивание // Почвоведение. № 12. С. 16-27.
- Романов В.А.* 2022. Сравнение способов классификации данных при спутниковом мониторинге процесса опустынивания // Научно-агрономический журнал. № 2. С. 25-35.
- Русакова И.В.* 2012. Ресурсосберегающие технологии использования растительных остатков // Агрехимический вестник. № 3. С. 40-43.
- Сапанов М.К., Сиземская М.Л.* 2010. Климатические изменения травянистой растительности на солончаковых почвах Северного Прикаспия // Поволжский экологический журнал. № 2. С. 185-194.
- Соколов И.А.* 1985. Экология почв, как раздел Докучаевского генетического почвоведения // Почвоведение. № 10. С. 38-46.
- Сотин А.Н.* 2000. Глобальные изменения климата и окружающая среда: тренды и прогнозы, реакция и поведение природно-антропогенных систем // Антропогенная деградация ландшафтов и экологическая безопасность. М.-Волгоград: ЮНЕП/ЦМП/ВНИАЛМИ. С. 92-102.
- Ташининова Л.Н., Ташининов А.А.* 2007. Почвы аридных зон Калмыкии в новой классификации почв России // Почвы Калмыкии. Элиста. С. 48-56.
- Чувашов А.В., Магов Д.Н., Степанова Н.Ю., Голуб В.Б.* 2024. Оценка динамики растительных сообществ в восточной части р. Волги // Аридные экосистемы. Т. 30. № 1. С. 67-74. [*Chuvashov A.V., Malov D.N., Stepanova N.Yu., Golub V.B.* 2024. Assessment of the Dynamics of Plant Communities in the East of the Volga

River Delta (1980-2023) // Arid Ecosystems. Vol. 14. No. 1. P. 56-62.]

- Шацко Д.И.* 1959. Агроклиматическое районирование СССР по обеспечению растений теплом и влагой. Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: Изд-во АН СССР. 96 с.
- Шишов Л.Л., Панкова Е.И.* 2006. Засоленные почвы России. М.: ИКЦ Академкнига. 850 с.
- Шульгин А.М.* 1955. Климат почв Европейской территории СССР в связи с почвенной зональностью // Известия АН СССР. Серия географическая. № 6. С. 18-24.

УДК 551.89; 631.42;

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СРЕДНЕЙ БРОНЗЫ  
НА ОСНОВАНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕБЕННЫХ ПОЧВ  
КАМЕНСКОГО РАЙОНА РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

© 2024 г. Г.В. Нестерук\*, К.В. Дюжова\*, А.Ю. Данильченко\*\*,  
А.Г. Щипанова\*\*\*, Э.В. Ларина\*\*\*\*

\*Южный научный центр РАН

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41. E-mail: galanesv@yandex.ru

\*\*Каменский музей декоративно-прикладного искусства и народного творчества

Россия, 347800, г. Каменск-Шахтинский, Карла Маркса пр., д. 56.

E-mail: adanil4enko@yandex.ru

\*\*\*Ростовское археологическое научно-исследовательское общество

Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Андреева, д. 4/9, пом. 18. E-mail: schipanova.nastia@yandex.ru

\*\*\*\*Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета

Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 194/1. E-mail: larina.elvira@internet.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024. После доработки 01.08.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Палеоэкологические условия на территории Каменского района Ростовской области в эпоху средней бронзы, переходный от ямной к катакомбной культуре период, были реконструированы по результатам изучения почв объекта археологического наследия кургана 1 курганной группы «Малая Каменка VI». Установлено, что палеочерноземы и современные фоновые почвы относятся к тяжело- и среднесуглинистым, маломощным, среднегумусным, сформированным на тяжелых лессовидных суглинках. Значения pH верхних горизонтов почв близки к нейтральным. Возрастание pH в гумусовых горизонтах палеопочв имеет плавный характер (от 7.0 до 7.3), что указывает на «подтянутость» карбонатных образований к поверхности. Содержание в генетических горизонтах палеопочв Сг-ионов в значениях 0.15-0.30%, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 0.04-0.09%, Mg<sup>2+</sup> – 0.007-0.020% выше по сравнению с фоновой почвой, что может служить индикаторами более аридных палеоэкологических условий. Укороченность профилей почв, признаки активизации крупной почвенной фауны, следы обугленной фитомассы, более высокая граница вскипания почвенной массы для палеопочвы являются индикаторами аридной климатической фазы. Малое содержание в спорово-пыльцевых спектрах палеопочвы пыльцы древесных и кустарниковых растений (до 6.5%) и большая доля пыльцы ксерофильных видов, таких как полыни (до 17%), прочие представители семейства *Asteraceae* (до 20%), а также находки *Ephedra* (до 2%), указывают на повышение засушливости условий. Растительный покров представлял собой сухую степь с участием ксерофильного разнотравья. Отмеченные в верхних горизонтах фоновой почвы такие признаки, как следы выщелачивания от карбонатов, отсутствие следов засоления в профиле, заметная доля мезофильного разнотравья в спорово-пыльцевых спектрах, отражают более благоприятные условия увлажнения в настоящее время.

**Ключевые слова:** палеопочвы степных ландшафтов, морфологические и физико-химические свойства почв, спорово-пыльцевой анализ, изменение климата, археологические раскопки.

**DOI:** 10.24412/1993-3916-2024-4-60-69

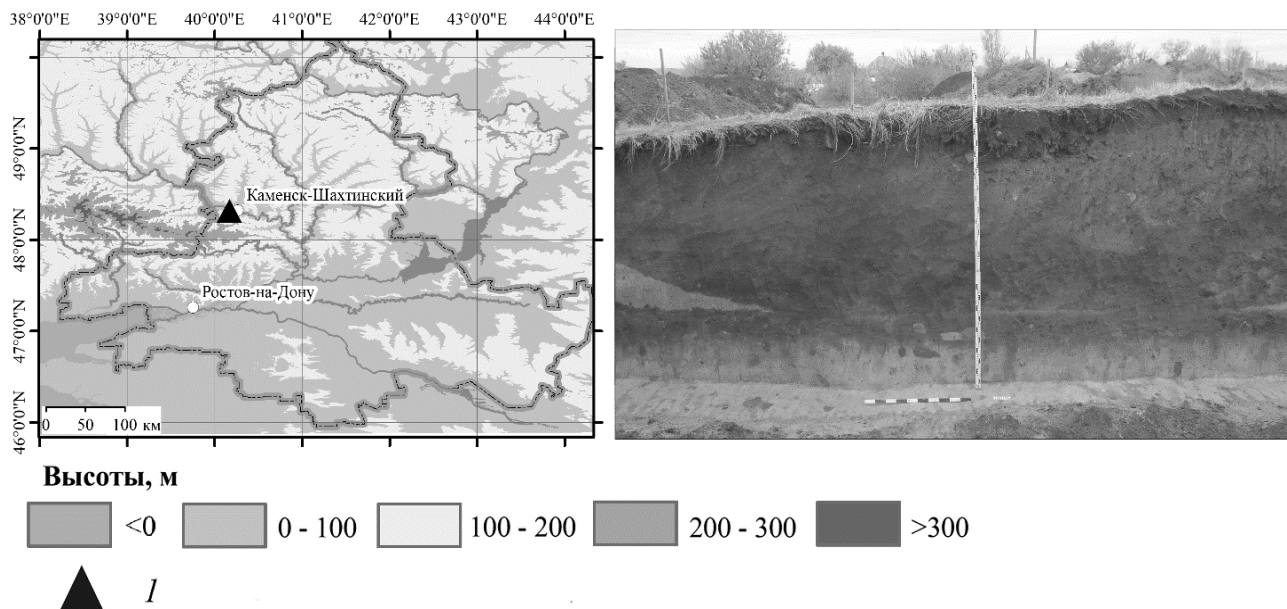
**EDN:** VYRNBW

Исследование естественной эволюции почв как компонента и зеркала ландшафта имеет особую актуальность. Индикатором палеоэкологических изменений, отражающим температурный режим и условия увлажнения, является состояние почв. Курганы и древние городища – это уникальные объекты, хранящие ценную информацию о почвенном покрове прошлого. Почвенно-археологические исследования по Ростовской области ограничены немногими работами Л.С. Песочиной с соавторами (2017), О.С. Безугловой с соавторами (2008), Д.Г. Невидомской и Л.П. Ильиной (2009)

и нашими исследованиями (Ильина и др., 2019; Нестерук и др., 2021; Khokhlova et al., 2019), в связи с чем актуально расширение массива данных для Донских степей путем привлечения новых археологических объектов различного возраста. Отмеченная В.А. Демкиным с соавторами (2010) высокая климатическая сенсорность черноземов Ростовской области дает основание использовать их в качестве информативного объекта при реконструкциях палеоэкологических условий среды. Важным методом изучения палеопочв является спорово-пыльцевой анализ, позволяющий получить данные о состоянии растительных сообществ и условиях их произрастания. Комплексный подход в изучении курганных палеопочв уже успешно используется (Сверчкова, Хохлова, 2021; Khokhlova et al., 2019; Демкин и др., 2010), что повышает достоверность палеореконструкций и дает более полную информацию о состоянии палеосреды.

### Материалы и методы

Объект исследования расположен в Каменском районе Ростовской области (географические координаты: 48° 19' 43.1" с.ш., 40° 10' 37.6" в.д.; рис. 1). Раскопки проводились в 2022 году в зоне планируемого строительства внутрипоселкового водопровода х. Малая Каменка. Среди 11 курганов курганной группы «Малая Каменка VI» исследованы палеопочвы кургана 1 (рис. 1): его высота составила 2.01 м, площадь – 2394 м<sup>2</sup> (Щипанова, 2023). Разрез современной фоновой почвы был заложен в 10 м к северу от кургана, на залежи рядом с участком жилой застройки, в схожих геолого-геоморфологических условиях.



**Рис. 1.** Ситуационный план расположения объекта исследования на фото западной стратиграфической бровки кургана, где 1 – это курган 1 курганной группы «Малая Каменка VI».

Климат района умеренно-континентальный, умеренно-засушливый, с недостаточно жарким летом и умеренно холодной зимой: средняя температура воздуха января –  $-6.6^{\circ}\text{C}$ , июля –  $+23^{\circ}\text{C}$ , среднегодовая –  $+8.1^{\circ}\text{C}$ , годовое количество осадков – 419 мм, коэффициент увлажнения – 0.46 (Смагина, 2009). Геологический фундамент образован породами каменноугольного возраста: карбонатные известняки, песчаники, сланцы с прослоями каменного угля (Zakrutkin et al., 2021), которые местами выходят на поверхность. Покрываются они меловыми, палеогеновыми, местами плиоценовыми отложениями, четвертичными глинами, песками и суглинками. Почвообразующие породы в основном лёссовидные суглинки и глины. В геоморфологическом отношении это территория Доно-Донецкой денудационно-эрозионной допалеоген- и палеоген-четвертичной грядово-холмистой равнины (Zakrutkin et al., 2021). Объект расположен на первой надпойменной террасе р. Северский Донец на высоте 51 м н.у.м. БС, приурочен к водоразделу, ограниченному поймой и старицами р. Северский Донец и правым берегом р. Малая Каменка. Рельеф расчлененный,

ложбинно-гравистый, речные долины ассиметричные, овражно-балочная сеть хорошо развита вследствие неоген-четвертичных разрывных нарушений и процессов выветривания. Гидрологическая сеть относится к водосборному бассейну р. Северский Донец, его площадь – 98.9 тыс. км<sup>2</sup>, объем годового стока – 4.76 км<sup>3</sup>. Среди озер-старичь наиболее близко к месту работ расположены оз. Месседжин и Сошник. Район лежит в зоне очень сильной водной и слабой ветровой эрозии, развиты процессы смыва и размыва более податливых пород. При ливневом характере осадков и быстром таянии снега обесструктуренные пахотные горизонты не успевают впитать всю воду, в результате чего возникает поверхностный сток и смыв почвы.

Основным зональным типом растительности, окружающей курганную группу, выступает разнотравно-типчаково-ковыльняная (разнотравно-дерновиннозлаковая) степь. На водоразделах и пологих склонах распространен подтип обедненной или разнотравной степи, где в травостоях преобладают типчак (*Festuca valesiaca* Gaudin) и ковыль Лессинга (*Stipa lessingiana* Trin. & Rupr.; здесь и далее латинские названия приведены по С.К. Черепанову (1995)). В пойме р. Северский Донец широко распространяются незасоленные и слабозасоленные разновидности настоящих лугов, присутствуют участки пойменного леса, в балках встречаются байрачные лесные сообщества. Объект исследования располагается на залежи с доминированием злаковой растительности, сорного разнотравья и участием степных и лугово-степных видов. Место граничит с распаханной сельхозугодьями и частной застройкой поселка. Почвы района относятся к Южно-Русской провинции обыкновенных среднегумусных и южных малогумусных черноземов, умеренно-теплой Восточно-Европейской фации теплых промерзающих почв (Вальков и др., 2008). Доминируют черноземы южные, черноземы обыкновенные и агрочерноземы.

Непосредственно на объекте проведено полевое морфологическое описание разрезов по работе Ф.Ф. Валькова с соавторами (2004), отобраны 23 образца почв по генетическим горизонтам. Физико-химический анализ плотного остатка и состава водной вытяжки, гранулометрического состава почв проведены по стандартным методикам (Аринушкина, 1970; Вадюнина, Корчагина, 1973), содержание органического вещества определяли по ГОСТ 26213-91 (1993) со спектрофотометрическим окончанием на «Флюорат-02-Панорама». В качестве основы использована «Классификация и диагностика почв СССР» (Егоров и др., 1977). Заложены 2 разреза (К-1п-22 на западной стенке кургана, К-2п-22 – на восточной) вскрытых под курганной насыпью палеочерноземов и 1 разрез (К-3ф-22) современной фоновой почвы.

Радиоуглеродное датирование (по гумусу) образцов из горизонта [А] палеопочвы выполнено в Лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Санкт-Петербургского государственного университета. Значения календарного возраста приведены на основании калибровочной программы «OxCal 4.4.4» (калибровочная кривая «IntCal 20», «Bomb21NH1»). Для определения состава субрецентных спорово-пыльцевых спектров был исследован образец поверхностного слоя современной почвы. В погребенной почве изучены 4 образца, отобранные в горизонте [А]. Верхние слои погребенной почвы имели либо очень слабую насыщенность материалом, либо он вовсе отсутствовал. Два образца из средней части горизонта [А] содержали достаточное для анализа количество пыльцы и спор. Описание природных условий времени создания кургана было проведено по совокупности данных состава спорово-пыльцевых спектров полученных образцов. Обработка проб проводилась по стандартной методике (Гричук, 1940) с использованием пирофосфата натрия. Для определения пыльцевых зерен и спор использовались атласы и определители (Куприянова, Алешина, 1978). При расчете процентного соотношения компонентов спорово-пыльцевых спектров за 100% была принята сумма всех пыльцевых зерен и спор.

### Результаты и обсуждение

Согласно данным радиоуглеродного датирования, календарный возраст погребенной почвы составляет 7000±100 лет назад (номер пробы – LU-11020), что соответствует неолитическому времени. Однако комплекс археологических артефактов из погребения свидетельствует о том, что образование подкурганной почвы коррелирует с эпохой средней бронзы, переходным временем от ямной к катакомбной культуре. Мы придерживаемся точки зрения о том, что абсолютная датировка является удревшенной, и принимаем возраст изучаемой почвы согласно археологическим датировкам, который соответствует рубежу III-II тысячелетия до н.э. (около 4 тыс. лет назад).

*Почвенные исследования.* Насыпь кургана 1 курганной группы «Малая Каменка VI», сформированная из темно-коричневого материала гумусового горизонта древней почвы, отличается большим количеством карбонатных новообразований (белоглазки) и выше средней степенью зоотурбированности (часто встречаются кротовины). Граница насыпи и погребенной почвы диагностируется по цвету (рис. 1).

Морфологический анализ показал, что профили погребенных почв имели схожее строение: [A] (0-16(22) см) – [AB] (до 23-27) – [В<sub>Ca</sub>] (до 40-44) – [ВС<sub>Ca</sub>] (до 60) – [ВС<sub>Ca</sub>] (до 90 см) – [С]; современная почва состояла из горизонтов: Ad (0-6 см) – А (до 30) – АВ (до 41) – В<sub>Ca</sub> (до 55) – ВС<sub>Ca</sub> (до 80) – ВС<sub>Ca</sub> (до 103 см) – С. Профили палеопочв имели небольшую протяженность, языковатые границы гумусовых горизонтов, следы активной зоотурбации и размытость границ карбонатных новообразований в средней части профиля. При этом разрез К-2п-22 отличался в среднем на 5 см большей протяженностью генетических горизонтов и наличием в горизонте [A] следов горения растительной массы в виде мелких угольков. Граница вскипания почвенной массы от взаимодействия с 10% HCl в палеочерноземах находится на меньшей глубине (16-25 см), чем в современной почве (30 см).

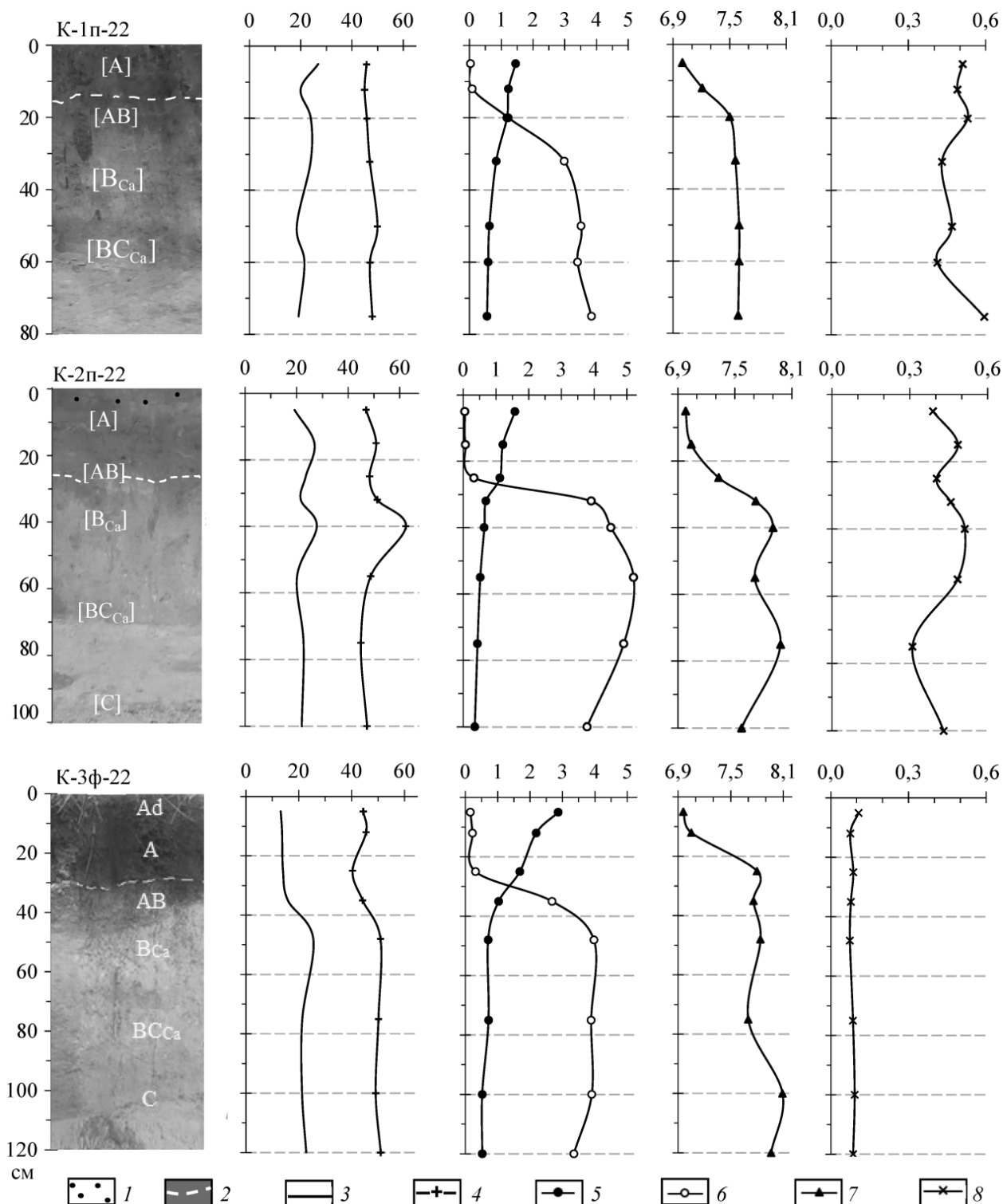
В современной почве отмечены более темный цвет и бо́льшая мощность гумусовых горизонтов (41 см), чем в палеопочвах (23-27 см), встречался псевдомицелий, затеки гумуса по корнеходам в нижние горизонты. Четко очерченные мелкие карбонаты только в верхней части гумусовых горизонтов и материнской породе, в средней части профиля они имели средний размер (до 1.0-1.5 см в палеопочвах и до 0.8-0.9 см в фоновой) и нечеткие границы. Размытость границ карбонатных новообразований может быть вызвана как активной роющей деятельностью почвенной фауны, так и латеральным переносом влаги по склону.

Физико-химические свойства исследуемых почв следующие. Почвообразующими породами служат тяжелые лессовидные суглинки. По гранулометрическому составу палеопочвы относятся к тяжелосуглинистым, современная почва переходная между средне- и тяжелосуглинистой. В палеопочвах преобладают фракции среднего песка и крупной пыли, в составе гумусовых горизонтов 45-50% физической глины. В фоновой почве возрастает процент мелкого, и особенно среднего песка и мелкой пыли за счет уменьшения доли ила, она имеет более опесчаненные верхние горизонты, в которых физглины 40-45% (рис. 2).

Профильное распределение органического вещества для разрезов К-1п-22 и К-2п-22 имеет схожий характер (рис. 2). Содержания  $C_{орг}$  снижается от 1.46-1.58% в верхней части горизонта [A] до 1.21-1.23% в нижней. В горизонте [AB] оно составляет 1.12-1.18%. Однако более правомерно сравнение содержания гумуса не во всей почвенной массе гумусовых горизонтов почв, а во фракции физической глины (< 0.01 мм), чтобы исключить разбавляющее действие почти безгумусового физического песка (> 0.01 мм). Подсчитанное по приведенным в работе В.С. Крыщенко с соавторами (2014) формулам содержание  $C_{орг}$  в физической глине верхних горизонтов палеопочв изменяется в пределах 1.32-1.52% (до 1.99% в пирогенно нарушенном горизонте разреза К-2п-22), а фоновой почвы – 3.36-4.54%. При учете минерализации гумуса за 4000 лет погребения остается около 36% органического вещества (Иванов и др., 2009); реконструированные на время погребения значения составляют 3.67-4.22% органического углерода, что в пересчете на гумус соответствует среднегумусной разности. По содержанию гумуса палеопочвы были близки к современным.

Содержание карбонатов ( $C_{карб}$ ) в профилях почв имеет близкие значения и похожий характер распределения по профилю: вынос из гумусовых горизонтов и накопление в карбонатно-аккумулятивных горизонтах. Прослеживается тенденция увеличения содержания  $C_{карб}$  от верхней (0.01-0.09% в палео, 0.04-0.09 в фоновой) к нижней части профилей (0.33-1.42% палео, 0.73-1.08% фоновой) почв. Ниже линии вскипания почвенной массы от 10% HCl наблюдается высокая окарбонченность профиля, что согласуется со значительным возрастанием содержания карбонатов и увеличением уровней pH. Максимум содержания карбонатов отмечен в карбонатно-аккумулятивных горизонтах почв.

Уровни pH минимальны (близки к нейтральным) в верхней части и резко возрастают на уровне линии вскипания, т.е. в нижней части горизонта [A]. В современной почве этот скачок более резкий (от 6.96 до 7.8). В гумусовых горизонтах палеопочв это возрастание pH имеет более плавный характер (от 7.0 до 7.3), что указывает на «подтянутость» карбонатных образований к поверхности.



**Рис. 2.** Морфологические и физико-химические параметры палео- (К-1п-22, К-2п-22) и современной фоновой (К-3ф-22) почв Малой Каменки. Условные обозначения: 1 – включения углей, 2 – верхняя граница вскипания от 10% HCl, 3 – содержание гранулометрических фракций < 0.001 мм, 4 – содержание фракций < 0.01 мм, 5 – содержание  $C_{орг}$ , %, 6 – содержание  $CO_{2карб}$ , %, 7 – pH водный, 8 – плотный остаток водной вытяжки, %.

По величине плотного (сухого) остатка (до 0.56%; рис. 2) палеопочвы засолены; степень засоления слабая, тип хлоридный. Содержание Cl-ионов 0.15-0.30% по всему профилю палеопочв

значительно превосходит данные величины для современной почвы, которые не превышают 0.02%. Содержание в палеопочвах  $\text{SO}_4^{2-}$  (0.04-0.09%) и  $\text{Mg}^{2+}$  (0.007-0.020%) выше по сравнению с фоновой почвой, в которой данные ионы не превышают 0.005%. Содержание гидрокарбонат-ионов (0.01-0.03%) и  $\text{Ca}^{2+}$  (0.01-0.04%) в почвах примерно одинаково. В целом фоновая почва не засолена, величины сухого остатка водной вытяжки не превышает 0.11% (рис. 2). При сопоставлении плотного и прокаленного остатка (в целях исключения влияния органических примесей) разница между их величинами не превышала 5-7%. Величины прокаленного остатка также оставались выше в палеопочвенных образцах по сравнению с фоновой почвой. Таким образом, плотный остаток и ионный состав водной вытяжки могут быть индикаторами более аридных палеоэкологических условий по сравнению с современными.

Морфологические и физико-химические свойства исследуемых палео- и современных почв очень схожи, однако имеют различия. Среди общего в морфологии размытые карбонаты в средней части профиля, следы активной зоотурбации, корневые «бусы». Однако палеопочвы отличаются укороченными профилями и коричневыми оттенками гумусово-аккумулятивных горизонтов, «подтянутостью» карбонатов к поверхности, укрупнением сегрегационных форм карбонатов, что является чертами аридизации. В палеопочве преобладают следы роющей деятельности крупной почвенной фауны, а в современной – более мелкой. Обильные и распространенные на большую глубину норы крупных землероев в хорошо прогретой почве, предположительно, могут быть индикатором более аридных условий по сравнению с современными. Размытость границ карбонатных конкреций может иметь место вследствие активной роющей деятельности почвенной фауны. Ввиду присутствия угольков в гумусовом горизонте имели место локальные пирогенные нарушения. Диагностированная морфологически аридизация палеоклимата отразилась на некоторых физико-химических свойствах почв: прежде всего, на наличии или отсутствии засоления. Большинство физико-химических свойств показало стабильность во времени и позволяе судить о принадлежности палео- и современных почв к одному и тому же типу и подтипу. Карбонатный профиль почв оказался более динамичным, – он успел зафиксировать смену аридных и гумидных условий.

Наши результаты согласуются с выводами других авторов для исследуемой (Демкин и др., 2010; Песочина, 2017) и сопредельных территорий (Герасименко, 2004). Согласно их данным, аридные условия к концу III тысячелетия до н.э. вызвали палеоэкологический кризис. Сопутствующими ему процессами были усиление дефляции, засоление и дегумификация, окарбоначивание почв. Почвенным профилям была свойственна слабая выраженность миграционных карбонатов (псевдомицелия) и преобладание сегрегационных форм карбонатов, черты призматичности нижних горизонтов. Особенностью палеопочв было слабое хлоридно-содовое в верхней и среднее сульфатное засоление в нижней части профиля (Песочина, 2017). Наши результаты подтверждают существование аридной палеоклиматической фазы на рубеже III-II тыс. л. до н.э. и согласуются с полученными данными на объекте того же времени «Высочино-VI/VIII» (Нестерук и др., 2021).

*Данные спорово-пыльцевого анализа.* Исследование субрецентных спорово-пыльцевых спектров проводят с целью определения достоверности отражения в них компонентов современного растительного покрова. Состав пыльцы и спор изученной фоновой почвы указывает на степной тип растительности, где преобладают степные, лугово-степные виды, а также участвует сорное разнотравье. Содержание пыльцы древесных и кустарниковых растений не превышает 10% (табл.). Преобладающая роль находится у пыльцы сосны – 4%, встречены пыльцевые зерна *Alnus* sp., *Betula* sp., *Quercus* sp., *Ulmus* sp., *Salix* sp., содержание которых находится на уровне 1%. Искусственные сосновые насаждения к северу от места отбора образца служат источником поступления пыльцы сосны воздушным путем. Пыльцевые зерна прочих древесных пород могут переноситься от участков пойменного леса, которые встречаются на берегах р. Северский Донец. Доминирующей древесной породой пойменных лесов является тополь, пыльца которого обладает плохой сохранностью и встречена единично в субрецентном спорово-пыльцевом спектре.

В группе трав лидирующая роль принадлежит пыльце растений из семейства *Amaranthaceae* (*Chenopodiaceae*) – 42%, большую долю которой продуцируют сорные виды (*Amaranthus retroflexus* L., *Atriplex tatarica* L., *Chenopodium* spp.). Несмотря на то, что основную часть травостоя составляют злаки (*Poaceae*), содержание их в спектре не более 6%, что может объясняться плохой

сохранностью в почве. Пыльца полыни (*Artemisia* sp.) не превышает 7%, пыльца представителей прочих *Asteraceae*, часть из которых также продуцируется сорными видами, составляет 8%. Пыльца мезофильного разнотравья представлена видами семейств *Rosaceae* и *Scrophulariaceae* (табл.) и составляет примерно 14%. Заметно участие пыльцы прочей сорной растительности – *Polygonaceae*, *Convolvulaceae*, *Rapaveraceae*.

**Таблица.** Состав основных компонентов спорово-пыльцевых спектров современной (К-3ф-22) и ископаемой почв (К-2п-22).

Таксон	Содержание компонентов, %		
	Современная почва	Палеопочва	
		Верхняя часть горизонта [A]	Средняя часть горизонта [A]
<i>Pinus sylvestris</i> L., сосна обыкновенная	4.2	2.2	2.5
<i>Betula</i> sp., береза	1.0	1.1	0.8
<i>Quercus</i> sp., дуб	1.0	1.1	0.0
<i>Ulmus</i> sp., вяз	1.3	1.1	0.8
<i>Alnus</i> sp., ольха	1.0	0.0	0.0
<i>Salix</i> sp., ива	1.3	1.1	0.8
<i>Artemisia</i> spp.,	6.4	17.2	11.0
<i>Asteraceae</i> , сложноцветные	7.7	20.4	14.4
<i>Centaurea cyanus</i> L., василёк синий	0.3	0.0	0.0
<i>Brassicaceae</i> , капустные	1.6	0.0	0.8
<i>Amaranthaceae</i> ( <i>Chenopodiaceae</i> ), щирицевые	41.7	4.3	48.3
<i>Cucurbitaceae</i> , тыквенные	2.2	0.0	0.0
<i>Asteraceae</i> <i>Cichorioideae</i> , цикориевые	4.8	1.1	0.0
<i>Cyperaceae</i> , осоковые	1.3	0.0	0.0
<i>Typhaceae</i> , рогозовые	1.0	0.0	0.0
<i>Cerealia</i> , культурные злаки	1.9	0.0	0.0
<i>Poaceae</i> , злаки	5.8	28.0	10.2
<i>Polygonaceae</i> , гречишные	2.6	0.0	0.0
<i>Ephedra</i> sp., эфедра	0.0	2.2	0.0
<i>Rosaceae</i> , розоцветные	1.6	8.6	5.1
<b>Итого компонентов:</b>			
пыльца деревьев и кустарников	9.6	6.5	5.1
пыльца трав и кустарничков	88.5	92.5	94.9
мезофильное разнотравье	14	9.7	5.9
травянистые ксерофиты	6.4	19.4	11
споры	1.9	1.1	0.0

Встречается пыльца гигрофитов из семейств *Cyperaceae* и *Juncaceae*; прибрежно-водная растительность представлена пылью растений семейства *Typhaceae*. Группа спор немногочисленна (до 2%) и состоит преимущественно из представителей бриевых мхов (*Bryales*). Можно отметить, что такой состав пыльцевых зерен и спор отражает картину окружающих степных сообществ, с заниженным участием в спектрах пыльцы злаков, что необходимо учитывать при палеорекострукциях. Древесные компоненты спектра имеют признаки удаленного расположения пойменной лесной растительности.

Ископаемые спорово-пыльцевые спектры толщи горизонта [A] относятся к степному типу. Здесь абсолютное доминирование у пыльцы трав, которая составляет более 90%. Доля пыльцы древесных и кустарниковых растений не превышает 6.5%. В древесной части спектра в отличие от

современной почвы количество пыльцы сосны в два раза меньше, что может указывать на отсутствие участков сосновых лесов на момент создания кургана. Число пыльцы прочих древесных (*Betula* sp., *Quercus* sp., *Ulmus* sp., *Salix* sp.) может указывать на еще меньшие, чем в настоящее время, площади пойменных лесов.

В группе пыльцы трав доминируют представители семейства Poaceae (28%), что значительно больше, чем в современных спектрах. Искусственное перекрытие палеопочвы во время создания курганной насыпи помогло пыльце злаков не разрушиться и сохраниться в заметном количестве, что может отражать наиболее достоверную картину участия злаков в растительном покрове.

Еще одним преобладающим компонентом выступает пыльца различных видов полыни (*Artemisia*), относящейся к группе травянистых ксерофитов. Ее доля гораздо выше, чем в современном спектре, и достигает 17%. К группе ксерофитов также относится найденная в ископаемой почве в количестве 2% пыльца эфедры (*Ephedra* sp.) – растения, произрастающего в местах с недостаточным увлажнением и не отмеченного в субрецентном спорово-пыльцевом спектре.

Следует обратить внимание на содержание пыльцы Amaranthaceae в ископаемых спорово-пыльцевых спектрах, которая также могла продуцироваться сорными видами. В спектрах образца из вышерасположенных слоев горизонта [А] пыльца содержится в гораздо меньших количествах, чем в современных спектрах, – всего 4%. Однако в нижерасположенном слое содержание пыльцы маревых увеличивается в спектре до 48%. Это, вероятно, связано с перемещением пыльцевых зерен в нижележащие горизонты, что позволяет нам сделать выводы о значительном и подобном современному участии представителей данного семейства в растительном покрове.

Значительная доля в ископаемых спектрах принадлежит пыльце сложноцветных (Asteraceae) – до 20%. Некоторые виды данного семейства относятся к ксерофильно-степной группе, что может указывать на повышение засушливости условий. Количество пыльцы мезофильного разнотравья в спектрах палеопочвы не превышает 10%, что немного меньше ее содержания в субрецентных спектрах.

При сравнении спорово-пыльцевых спектров современной и палеопочвы можно отметить, что около 4 тыс. л.н. тип растительного покрова представлял собой сухую степь с участием ксерофильного разнотравья. Это отражает распространение более засушливых, чем современные, условий. Значительная аридизация климата около 4200-3700 лет назад отмечена в работах К.В. Кременецкого (1997) при изучении многослойного поселения Раздорское, расположенного на территории Нижнего Дона.

### Выводы

Проведенные комплексные исследования позволили реконструировать палеоэкологическую обстановку на территории Ростовской области в эпоху средней бронзы. Синтез почвенных и палинологических данных диагностировал более засушливые условия около 4 тыс. л.н. по сравнению с современными. Это отразилось на некоторых особенностях морфологии профилей, а именно, на динамике карбонатного состояния почвенного профиля, содержании солей в водной вытяжке и составе споро-пыльцевых спектров.

Распределение по профилю значений рН, положение границы вскипания почвенной массы, «подтянутость» карбонатов к поверхности, засоленность палеопочв легкорастворимыми солями, усиление сегрегации карбонатов – все это является индикатором засушливых палеоусловий. В современной почве более выщелоченные от карбонатов верхние горизонты и близкая к нейтральной реакция среды верхних горизонтов диагностируют более гумидные условия. Сходство морфологии и физико-химических свойств исследуемых ископаемой и современной почв указывают на преобладание степной модели процесса почвообразования. Близкая к современной реконструируемая гумусированность палеопочв может быть откликом на предшествующую, благоприятную для гумусонакопления палеоклиматическую фазу. В два раза большие величины плотного остатка (слабое засоление хлоридами и относительно высокие содержания сульфатов) в горизонтах палеочерноземов являются индикатором аридных условий. В профиле фоновой почвы отсутствие следов засоления не означает смену подтипа почв, а лишь свидетельствует о более благоприятных условиях увлажнения. Палео- и современные почвы относятся к черноземам южным маломощным, среднегумусным, сформированным на тяжелосуглинистых отложениях.

При этом палеочерноземы имеют некоторые черты более южного подтипа.

Интерпретация данных спорово-пыльцевого анализа и сравнение современных с ископаемыми спектров позволили сделать выводы о состоянии растительного покрова, а также климате во время формирования палеопочвы. Меньшие по сравнению с современностью участки пойменной лесной растительности, увеличение в растительном покрове доли травянистых ксерофитов, снижение мезофитного разнотравья могут указывать на существование более засушливых, чем современные, условий.

*Благодарности.* Авторы выражают благодарность П.С. Пляке за помощь в проведении анализа органического вещества почв.

*Финансирование.* Исследования осуществлены в рамках реализации госзадания Южного научного центра РАН, № гр. проекта 122011900166-9.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариунушкина Е.В.* 1970. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета. 487 с.
- Безуглова О.С., Морозов И.В., Куторовский М.А.* 2008. Погребенные почвы Недвиговского городища (Приазовье) и роль древнего антропогенного фактора в формировании черноземов // Почвоведение. № 1. С. 17-26.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* 1973. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. Учебное пособие для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 399 с.
- Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* 2004. Почвоведение: учебник для вузов. М.: ИКЦ «МарТ». 496 с.
- Вальков Ф.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* 2008. Почвы Юга России. Ростов-на-Дону: Эверест. 276 с.
- Герасименко Н.П.* 2004. Развитие зональных ландшафтов четвертичного периода на территории Украины. Автореф. дисс. ... док. геогр. наук. Киев: Институт географии НАН Украины. 41 с.
- ГОСТ 26213-91. 1993. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Изд-во стандартов [Электронный ресурс <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294828/4294828267.htm> (дата обращения 10.09.2024)].
- Гричук В.П.* 1940. Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пыльцевого анализа // Проблемы физической географии. Вып. 8. С. 53-58.
- Демкин В.А., Борисов А.В., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Золотарева Б.Н., Каширская Н.Н., Удальцов С.Н., Ельцов М.В.* 2010. Волго-Донские степи в древности и средневековье. Пушино: Synchronobook. 120 с.
- Егоров В.В., Иванова Е.Н., Фридланд В.М.* 1977. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос. 225 с.
- Иванов И.В., Песочина Л.С., Семенов В.М.* 2009. Биоминерализация органического вещества в современных целинных, пахотных, погребенных и ископаемых черноземах // Почвоведение. № 10. С. 1192-1202.
- Ильина Л.П., Нестерук Г.В., Сушко К.С., Невидомская Д.Г.* 2019. Трансформация почвенного покрова Приазовья в голоцене // Палеогеография Приазовья в голоцене. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН. С. 158-189.
- Кременецкий К.В.* 1997. Природная обстановка голоцена на Нижнем Дону и в Калмыкии // Степь и Кавказ. М.: ГИМ. № 97. С. 30-45.
- Крыщенко В.С., Рыбьянец Т.В., Кравцова Н.Е., Бирюкова О.А., Замулина И.В.* 2014. Мониторинг изменения дисперсности и гумусности почв в условиях аридизации климата // Аридные экосистемы. Т. 20. № 3 (60). С. 110-118. [Kryshchenko V.S., Rybianets T.V., Kravtsova N.Y., Biriukova O.A., Zamulina I.V. Monitoring Changes in Soil Dispersity and Humus Content under Increasingly Arid Climate Conditions // Arid Ecosystems. Vol. 4. No. 3. P. 220-227.]
- Куприянова Л.А., Алешина Л.А.* 1978. Пыльца двудольных растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука. 184 с.
- Невидомская Д.Г., Ильина Л.П.* 2009. Почвенные исследования археологических памятников бронзового века в различных типоморфных ландшафтах Нижнего Дона // Вестник Южного научного центра РАН. Т. 5. № 2. С. 73-83.
- Нестерук Г.В., Хохлова О.С., Ильина Л.П., Сверчкова А.Э., Сушко К.С.* 2021. Палеоэкологические условия Кубано-Приазовской низменности в эпоху бронзы и раннего железного века на основе изучения погребенных почв // Почвоведение. № 11. С. 1306-1321.
- Песочина Л.С.* 2017. Закономерности педогенеза в степях Приазовья во второй половине голоцена по данным почвенно-археологических исследований // Учёные записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География, Геология. Т. 3 (69). № 3. Ч. 1. С. 192-204.
- Смагина Т.А.* 2009. Структурно-генетическая классификация ландшафтов Ростовской области // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский Регион. Серия: Естественные Науки. № 4 (152). С. 131-136.
- Сверчкова А.Э., Хохлова О.С.* 2021. Эволюция почв и ландшафтно-климатические изменения в эпоху бронзы для степи Кубано-Приазовской равнины на основе изучения крупного кургана // Известия Российской академии наук. Серия географическая. Т. 85. № 1. С. 70-83.

- Щипанова А.Г.* 2023. Отчёт об археологических раскопках на территории курганов № 1, № 12, № 13 в составе объекта культурного наследия федерального значения «Курганная группа «Малая Каменка VI» в х. Малая Каменка Каменского района Ростовской области в 2022 году. С.-Пб.: Отраслевой архив ИА РАН. Т. 1-2.
- Черепанов С.К.* 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). С.-Пб.: Мир и семья. 992 с.
- Khokhlova O.S., Dyuzhova K.V., Golyeva A.A., Trifonova T.A., Bunin D.S., Iyashenko S.M., Khokhlov A.A., Shipkova G.V.* 2019. Paleocology of the Ancient City of Tanais (3RD Century BC – 5TH Century AD) on the North-Eastern Coast of the Sea of Azov (Russia) // Quaternary International. Vol. 516. P. 98-110.
- Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V.* 2021. River Bottom Sediments of Technogenic Disturbed Geosystems of the Eastern Donbas: Comparative Assessment of Pollution Level with Heavy Metals by Russian and International Criteria // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. Vol. 85 (4). P. 554-564.

**АНТРОПОГЕННОЕ ОСОЛОНЦЕВАНИЕ ПОЧВ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПАСТБИЩ  
ПУСТЫННО-СТЕПНОЙ ЗОНЫ**

© 2024 г. А.В. Борисов\*, М.В. Ельцов\*, И.А. Идрисов\*\*, В.Н. Пинской\*, А.К. Ходжаева\*

\*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН  
Россия, 142290, г. Пущино, ул. Институтская, д. 2, корп. 2. E-mail: a.v.borisovv@gmail.com

\*\*Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН  
Россия, 367030, г. Махачкала, ул. Ярагского, д. 75. E-mail: idris\_gun@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2024. После доработки 01.06.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Проведено исследование почв зимних пастбищ с разной интенсивностью пастбищной нагрузки на севере Терско-Кумской низменности. По результатам обследования почвенного покрова трех ключевых участков, расположенных на разном удалении от водопоя, установлено, что в зоне интенсивного скотопргона в структуре почвенного покрова возрастает доля солонцов. Наибольшая доля солонцов отмечена в 200-метровой зоне. Солонцы приурочены к скотопргоным тропам и вытянутым микропонижениям эрозионной природы. На удалении 500 м от водопоя солонцов не выявлено. Показано, что развитие солонцового процесса под влиянием выпаса скота является следствием сокращения растительного покрова и уплотнения почвы. Это приводит к снижению десукции и интенсивному нагреванию открытых участков, в результате чего происходит возрастание содержания солей в средней части профиля. В дальнейшем при периодическом увлажнении и высыхании верхних горизонтов происходит поступление в них солей натрия с капиллярно-подвешенными растворами и возрастание доли обменного натрия до 20-30% от емкости катионного обмена. Последующие эволюционные преобразования солонцов связаны с сокращением мощности горизонта SEL вплоть до полной его утраты в результате эрозии и дефляции и полное уничтожение растительного покрова. Десуктивно-выпотной водный режим сменяется периодически выпотным, происходит деградация солонцовых признаков за счет поверхностного засоления. Таким образом, происходит пастбищная эволюция каштановых почв в солонцы и далее в абраземы *постсолонцовые* солончаковые, которые образуют крупные ареалы «бедлендов» у ферм и водопоев.

*Ключевые слова:* осолонцевание, перевыпас, пустынно-степная зона, светло-каштановые почвы, солонцы, обменные основания, засоление.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-70-77**

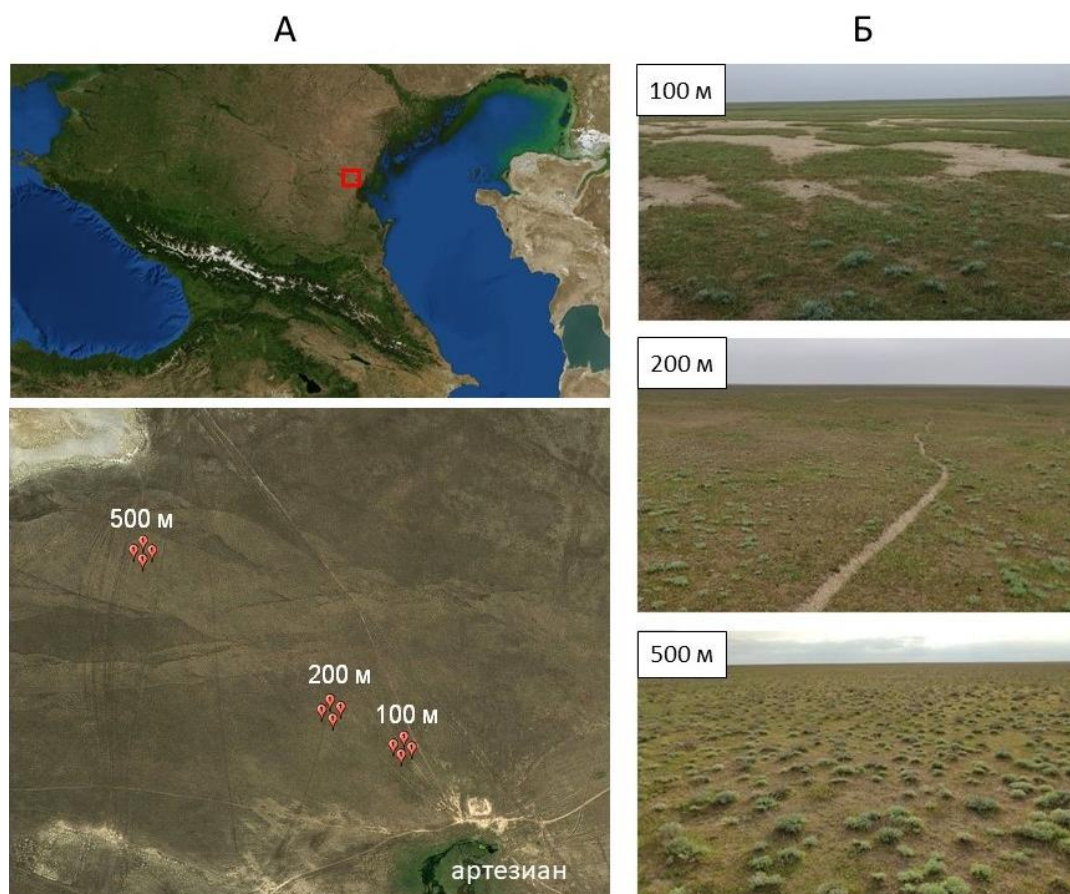
**EDN: WCDBYW**

В степных почвах, которые на определенной глубине имеют солевые аккумуляции, в результате перевыпаса скота может происходить подъем верхней кровли солевого горизонта (Любимова и др., 2012; Di Bella et al., 2014; Lavado, Taboada, 1987; Котенко, 1993), что потенциально может вызывать развитие солонцовых свойств как следствие изменения характера солевого режима (Минкин и др., 1980). Однако работы по изучению влияния выпаса скота на солонцовый процесс, несмотря на глубокую изученность феномена солонцов (Генезис и мелиорация ..., 2008), до недавнего времени не проводились. Ранее поднимался вопрос о связи интенсивной пастбы скота с такими морфологическими проявлениями солонцового процесса, как осветление верхнего горизонта и накопление солей в верхней части профиля (Залибеков, 1982), но вывод о прямой связи между подъемом солей вследствие выпаса и возможностью развития солонцового процесса тогда не был сделан. На данный момент известны лишь доказательства связи перевыпаса и развития солонцов в почвах тяжелого гранулометрического состава в сухостепной зоне (Борисов и др., 2023). В историческом аспекте было отмечено хронологическое совпадение первых признаков солонцового процесса и расцвета блока катакомбных культур кочевников-овцеводов эпохи средней бронзы, специализировавшихся на разведении овец (Борисов, Алексеев, 2020). В данной статье предпринята

попытка оценить влияние выпаса скота на развитие солонцового процесса в легкосуглинистых почвах пустынно-степной зоны.

### Материалы и методы

Объекты исследования расположены в Терско-Кумском междуречье (рис. 1А) и приурочены к северной ее части – Прикумской супесчано-суглинистой равнине. Территория сложена преимущественно супесчаными отложениями древних трансгрессий Каспия, перекрытыми легкосуглинистым наносом эоловой природы. Значительные площади занимают солончаки и соленые озера. Климат района континентальный, с холодными малоснежными зимами и жарким летом. Средние летние температуры составляют  $+24^{\circ}\text{C}$ , зимние –  $-1.2^{\circ}\text{C}$ . Сумма годовых осадков достигает 380 мм, большая часть которых выпадает с мая по июль. Зимы почти бесснежные. Территория используется как зимнее пастбище. В растительном покрове преобладают полынно-злаковые ассоциации. В почвенном покрове участвуют каштановые почвы и солончаки.



**Рис. 1.** Расположение тестовых площадок (А) и состояние растительного покрова на разном удалении от водопоя (Б).

Тестовый участок располагался в 12 км к северо-западу от п. Кочубей Тарумовского района Республики Дагестан (географические координаты:  $44.48050^{\circ}$  с.ш.,  $46.45893^{\circ}$  в.д.). Для изучения влияния выпаса скота на свойства почв были проведены исследования почв на 3 площадках, расположенных на удалении 100, 200 и 500 м от водопоя. Перепад высот – менее 1 м на 500 м. Растительный покров тестового участка значительно изменялся по мере удаления от артезианского колодца (рис. 1 Б). Так, в радиусе до 50-70 м растительный покров фрагментарный, до половины площади занимают скотосбой, лишённые растительного покрова («бедленды»). На удалении 200 м заметны только скотосбойные тропы, растительный покров более густой, проективное покрытие – до 50%. На удалении 400-500 м от артезианского колодца скотосбойных троп нет, растительный покров без следов сбоя, проективное покрытие – более 50%

Обследование почв проводили на площадках размером 20 × 20 м. Выполняли инструментальную высотную съемку поверхности через каждые 2 метра с помощью нивелира. По полученным данным строили карты микрорельефа в программе Surfer.

Через каждые 2 м по сетке закладывали прикопки глубиной 40-50 см. В них проводили описание почвенного профиля, замер мощности почвенных горизонтов AJ/SEL и BMK/BSN, определение типовой, родовой и видовой (для солонцов) принадлежности почвенных разностей. Особое внимание уделяли степени выраженности солонцового процесса. На основе полученных данных строили карту структуры почвенного покрова в программе Surfer.

На площадке 100 м была заложена траншея таким образом, чтобы один ее край вскрывал солонец, а второй – каштановую почву с минимальными проявлениями солонцовых признаков. В траншее выполняли морфолого-генетический анализ почвенного профиля и отбор почвенных образцов на химические анализы. Также почвенные разрезы были заложены на площадке 500 м и в центре обширного пятна бедленда в 70 м от водопоя.

Почвенные образцы на химические анализы отбирали по горизонтам в верхней части профиля, и послойно из каждого 10 см слоя по всему профилю. В образцах определяли состав водной вытяжки, содержание органического углерода по методу И.В. Тюрина, содержание карбонатов и гипса (Аринушкина, 1970). Обменные основания определяли по методу Пфедфера в модификации В.А. Молодцова и В.П. Игнатовой. Определение гранулометрического состава проводили пипеточным методом. Химические анализы выполнялись в Центре коллективного пользования Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН.

### Результаты и обсуждение

*Морфологические свойства почв.* На площадке удаления 100 м преобладали комплексы каштановых почв и солонцов. В профиле каштановых почв выделялся горизонт AJ мощностью до 10 см, постепенно переходящий в горизонт BMK с хорошо заметными трещинами усыхания. Почва вскипала с 25 см. Новообразования гипса и легкорастворимых солей – с глубины 80 см.

В солонцах мощность горизонт SEL составляла 5-7 см, при этом под скотосбойной тропой мощность его не превышала 2 см. Горизонт BSN бурый, структура призмовидная, с хорошо заметной вертикальной ориентировкой призм. Вскипание – с 17-20 см, новообразования гипса и легкорастворимых солей – с глубины 30 см.

На площадке 500 м во всех прикопках были обнаружены только каштановые почвы. Вскипание – с глубины 80 см. Верхняя граница солевого горизонта – с глубины 100-120 см. На всех площадках с глубины 150-160 см залегала зеленовато-серая супесь.

Почвы бедлендов вблизи водопоя представлены абразёмами постсолонцовыми<sup>1</sup>. В этих почвах с поверхности залегал горизонт BSNs с призмовидно-глыбистой непрочной структурой, красно-бурый с постепенным снижением доли бурых тонов с глубиной. Этот горизонт сформировался на месте горизонта BSN солонца, деградированного в результате периодического поверхностного засоления. Карбонатная пропитка появляется с поверхности при подсыхании профиля.

*Микрорельеф* на всех тестовых площадках был слабо выражен, превышение высот в пределах площадок составило 10-12 см (рис. 2 А). На площадке удаления 100 м микрорельеф был более заметный, с западинами вытянутой формы, приуроченными к скотопогонным тропам<sup>2</sup>. В местах, где скотопогонные тропы сливались, образовывались обширные участки, лишённые растительности, поверхность которых была на 3-5 см ниже прилегающих к ним задернованных участков. На площадке удаления 200 м были заметны только отдельные магистральные скотопогонные тропы, также заглубленные на несколько сантиметров.

*Доля солонцов в структуре почвенного покрова* заметно варьировалась, и по мере удаления от водопоя признаки солонцового процесса становились менее выраженными. Так, на площадке удаления 100 м от водопоя доля солонцов в структуре почвенного покрова составляла 30-40%

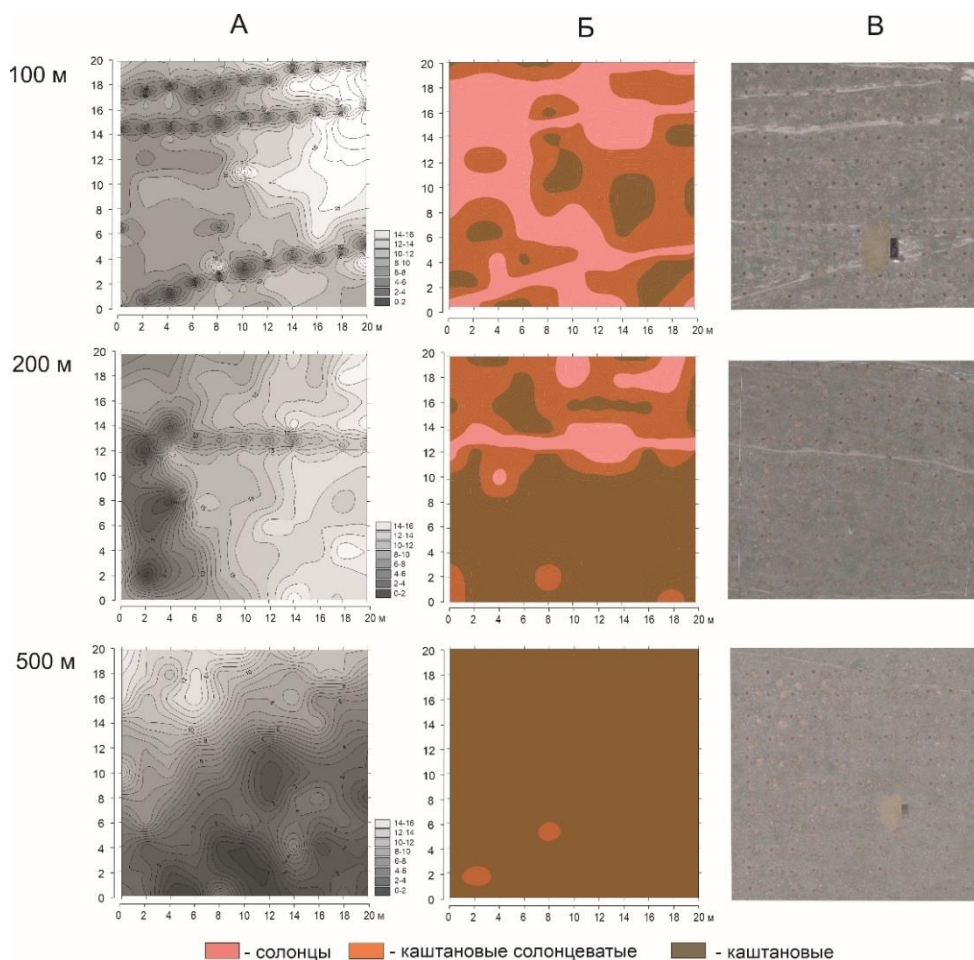
<sup>1</sup>Т.к. признаки солонцового процесса в этих почвах уже не проявляются в результате высокого содержания солей, мы предлагаем называть такие почвы «абразёмами постсолонцовыми». Это следующая ступень эволюции абразёмов солонцовых.

<sup>2</sup>Т.к. прикопки закладывали по скотосбойным тропам через 2 м, программа Surfer отображает заглубленную поверхность троп в виде отдельных понижений, не связывая их.

(рис. 2 Б). По мере удаления от водопоя доля солонцов снижалась, на площадке 500 м солонцы не были обнаружены.

*Гранулометрический состав почв.* Распределения ила в профиле (рис. 3А) указывает на активное развитие солонцового процесса в почвах возле водопоя. Наиболее сильно это проявляется в солонцах и абразмах постсолонцовых. Но и в светло-каштановой почве заметно некоторое обогащение илом в слое 40-60 см. Обогащение илом и глиной верхней части профиля ниже иллювиального горизонта можно связывать с общим легким гранулометрическим составом почв (доля мелкого песка – 45-70%), что обеспечивает условия для нисходящей миграции мелких фракций на начальных стадиях солонцового процесса. По мере формирования горизонта BSN этот транспорт снижается и начинается аккумуляция ила в иллювиальном горизонте.

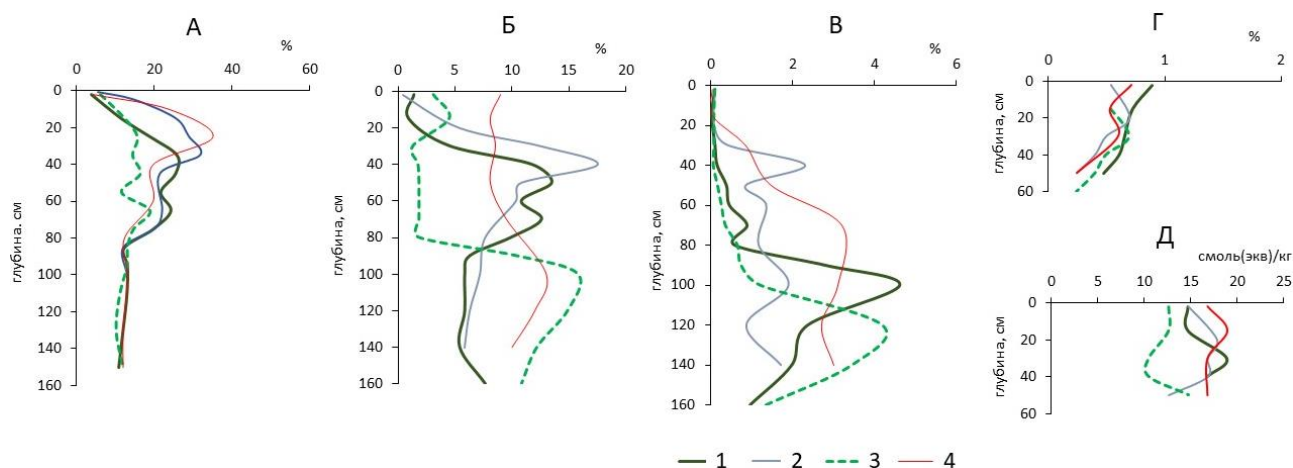
*Химические свойства.* Химические свойства почв на разном удалении от водопоя существенно варьировали. В почвах на удалении 100 м пик содержания карбонатов был в слое 30-50 см (рис. 3 Б). Особенно заметно накопление карбонатов в солонце, где уже на глубине 10-20 см содержание  $\text{CaCO}_3$  превышало 5%, а в слое 30-40 см этот показатель составлял 17.5%. В светло-каштановых почвах карбонатный пик был менее выраженный и более широкий. На удалении 500 м от водопоя почвы имели нормальный характер распределения карбонатов, при котором профиль до 90 см был отмыт от карбонатов, а ниже была хорошо выраженная зона карбонатных аккумуляций. В бедленде карбонаты были с поверхности почвы; в профиле этот показатель варьировал незначительно, без характерного пика в средней части профиля.



**Рис. 2.** Микротопопланы делянок (А), соотношение солонцов и светло-каштановых почве почвенном покрове тестовых участков (Б) и вид на ключевые участки с прикопками (В).

Весьма сложным было профильное распределение гипса (рис. 3 В). В светло-каштановых почвах на удалении 500 м от артезианского колодца гипс залегал с глубины 120 см, где был четко

выраженный пик в слое 120-140 см. На площадке удаления 100 м гипсовый пик в светло-каштановых почвах имел такую же форму, но был выше на 20-30 см. В солонцах на этом участке гипс был довольно равномерно распределён по профилю, причем уже с глубины 30-40 см его содержание достигало 1.8%. Абраземы постсолонцовые отличались максимальным накоплением гипса по всему профилю, только верхние 10 см были отмыты от гипса.



**Рис. 3.** Профильное изменение содержания ила (А), карбонатов (Б), гипса (В),  $S_{\text{орг}}$  (Г) и емкости катионного обмена (Д). Условные обозначения: 1 – светло-каштановая почва на удалении 100 м, 2 – солонец на удалении 100 м, 3 – светло-каштановая почва на удалении 500 м, 4 – бедленд.

Профильное распределение органического углерода во всех почвах было, в целом, однотипным, при этом в светло-каштановых почвах на площадке удаления 100 м значения этого показателя были несколько выше, чем на площадке удаления 500 м (рис. 3Г). Следует отметить также довольно высокое содержание  $S_{\text{орг}}$  в почвах бедленда, где также были выявлены максимальные значения емкости катионного обмена (рис. 3 Д).

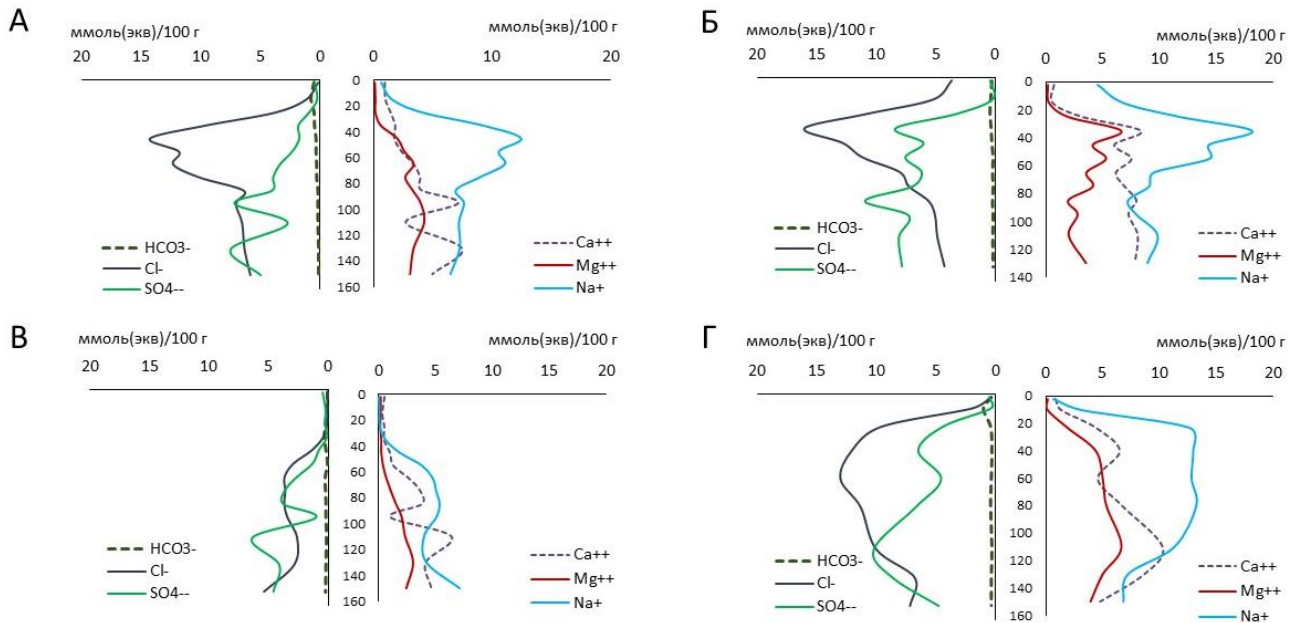
В профиле абразёма постсолонцового от солей отмыты только верхние 10-12 см. Учитывая, что карбонаты в нем встречаются с поверхности, можно ожидать, что соли и гипс также могут подниматься к поверхности в условиях летней засухи, но, будучи более растворимыми, вымываются их верхнего горизонта в осенне-зимний период.

Тип засоления почв сульфатно-хлоридный, лишь в нижней части профиля в отдельных случаях он хлоридно-сульфатный. Профильное распределение хлорид-иона в солонцах и каштановых почвах в зоне интенсивного выпаса и скотопргона практически однотипно; в то же время в солонцах заметно выше содержание сульфат-иона (рис. 4). Среди катионов абсолютно доминирует  $\text{Na}^+$ , в первую очередь в верхних горизонтах.

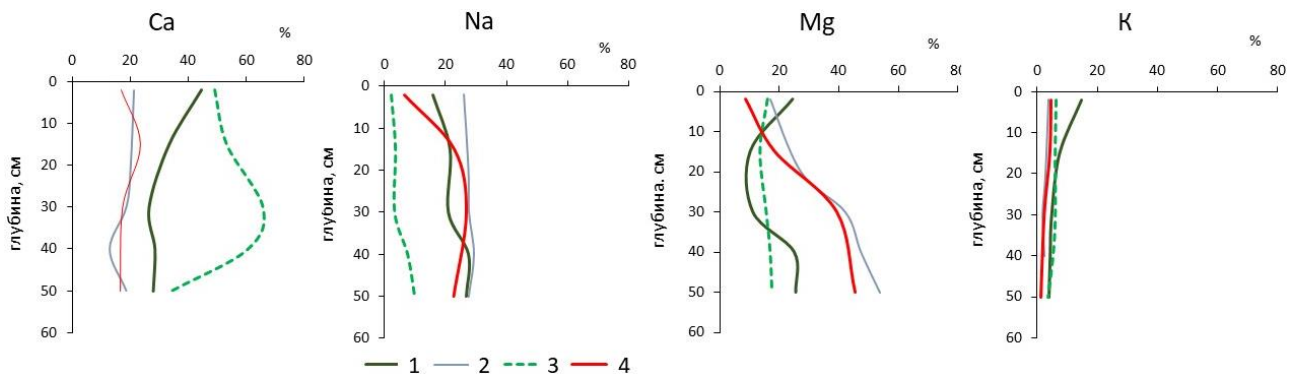
**Физико-химические свойства.** На участке удаления 500 м в составе обменных оснований абсолютно доминировал Са, доля которого в слое 30-40 см превышала 60% от емкости катионного обмена (ЕКО; рис. 5). Доля натрия была на уровне 5-7%, магния – 10-15%. На участке удаления 100 м отмечено более чем двукратное снижение доли обменного Са, причем оно было особенно заметно в солонцах. Снижение доли обменного Са происходило на фоне возрастания доли обменного Na до 20-30% от ЕКО и наблюдалось как в солонцах, так и в светло-каштановых не солонцеватых почвах и абраземах постсолонцовых. Однако в профильном распределении Mg была отмечена иная тенденция: в то время как в светло-каштановых почвах на удалении 500 м доля обменного Mg не превышала 15-20% по всему верхнему полуметровому слою, в светло-каштановых почвах вблизи водопоя уже отмечено возрастание этого показателя в слое 40-50 см. Эта же тенденция еще более выражена в почвах бедленда и солонца коркового, где доля Mg возрастала до 30-40% ЕКО.

**Закономерности распространения солонцов в зависимости от интенсивности пастбищной нагрузки и скотопргона.** В зоне скотопргона у водопоя хорошо заметны микропонижения вытянутой формы, приуроченные к скотопргонным тропам и имеющие, очевидно, эрозионную природу. На этих участках развиты солонцы корковые. Такой характер взаимосвязи микрорельефа

и почв показан для автоморфных ландшафтов сухостепной зоны в работах многих исследователей (Большаков, 1975; Иванова, 1976).



**Рис. 4.** Профильное распределение токсичных солей в исследованных почвах. А – светло-каштановая почва на удалении 100 м, Б – солонец на удалении 100 м, В – светло-каштановая почва на удалении 500 м, Г – абразем постсолонцовый.



**Рис. 5.** Содержание обменных оснований в почвах. Условные обозначения: 1 – светло-каштановая почва на удалении 100 м, 2 – солонец на удалении 100 м, 3 – светло-каштановая почва на удалении 500 м, 4 – бедленд.

На удалении 500 м от водопоя в зоне умеренного выпаса микрорельеф менее выражен, нет скотопрогонных троп и при этом нет солонцов. Таким образом, приуроченность солонцов к местам интенсивного выпаса и скотопрогона очевидна, что позволяет говорить о причинно-следственных связях этих явлений.

Рассмотрим возможные механизмы развития солонцового процесса в почвах в условиях интенсивного выпаса и скотопрогона. На первом этапе происходит сокращение проективного покрытия и разрушение слоя степного войлока, что вызывает увеличение инсоляции и уплотнение почвы (Лебедева и др., 2011; Greenwood, McKenzie, 2001), особенно сильно проявляющееся при зимнем выпасе (Donkor et al., 2002). Формируется система скотопрогонных троп, где все указанные выше явления наиболее выражены. Скотопрогонные тропы становятся очагами формирования микрорельефа за счет активизации эрозионных процессов и дефляции (Hancock et al., 2020;

Pulido et al., 2018). Лишенные растительности и степного войлока, такие участки сильнее нагреваются. Этот фактор вместе с повышенной плотностью обуславливает неоднородность физических свойств почвы, что в итоге приводит к формированию микрокомплексности почвенного покрова. По мнению Е.Н. Ивановой, «... миграции солей осуществляются вместе с восходящим передвижением влаги, вызванной иссушающим воздействием инсоляции на поверхность почвы. Они наиболее интенсивны на обнаженных участках и замирают под покровом растительности» (Иванова, 1976, с. 162). К подобным выводам приходили и другие исследователи (Егоров, 1967; Минкин и др., 1980). Таким образом, результатом первого этапа «пастбищного осолонцевания» является доставка натриевых солей в среднюю часть профиля почвы.

В дальнейшем образование и функционирование солонцов определяется периодическим как вертикальным, так и горизонтальным поступлением солей натрия с капиллярно-подвешенными растворами в процессе увлажнения и высыхания верхних горизонтов почв (Большаков, 1975). По мере формирования солонцовых признаков пульсирующий режим становится более выраженным. Это связано с тем, что характерная столбчатая или призмовидная структура солонцового горизонта, а также глубокие трещины иссушения позволяют влаге атмосферных осадков в первый момент после начала дождя или таяния снега (до набухания солонцового горизонта) проникнуть на глубину залегания солевых аккумуляций, а затем питать тонкокапиллярную систему солонца раствором (Большаков, 1975). В результате такого передвижения растворов и происходит постоянное осолонцевание почв.

Солонцы, формировавшиеся в зоне перевыпаса и скотопргона, в силу слабой задернованности более подвержены дальнейшей пастбищной деградации, чем светло-каштановые почвы. Это приводит к активной эрозии и дефляции горизонта SEL вплоть до его полной утраты. Параллельно с этим идет дальнейшее сокращение, вплоть до полного уничтожения, растительного покрова, что отключает десугирующее действие корневой системы растений, приводит к изменению десуктивно-выпотного режима на выпотной и обеспечивает условия для подъема минерализованных почвенных растворов к поверхности в периоды летнего иссушения почвы (Козловский, 2003). В условиях поверхностного засоления солонцовый процесс прекращается и корковые солонцы, лишенные верхнего горизонта, эволюционируют в почвы бедлендов – абраземы постсолонцовые.

### Выводы

В пустынно-степной зоне в почвах легкого гранулометрического состава интенсивный выпас скота приводит к увеличению доли солонцов в структуре почвенного покрова. Особенно сильно это проявляется в непосредственной близости (первые сотни метров) от ферм и водопоев. Очагами возникновения солонцов являются скотосбойные тропы и участки со стравленным растительным покровом.

Предпосылкой возникновения солонцов является неоднородность засоления, обусловленная более интенсивной инсоляцией открытых участков, что приводит к подъему верхней кровли солевого горизонта. Поддержание солонцового процесса связано с периодическим вертикальным и горизонтальным поступлением солей натрия с капиллярно-подвешенными растворами, в процессе периодического увлажнения и высыхания их верхних горизонтов.

В образовавшихся солонцах в условиях высокой пастбищной нагрузки происходит сокращением мощности горизонта SEL вплоть до его полной утраты, экспонированием горизонта BSN, увеличение содержания солей в нем в результате выпотного водного режима и затухание солонцового процесса. В результате на месте корковых солонцов формируются почвы бедлендов – абраземы постсолонцовые.

*Финансирование.* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-68-00010, а также использовались данные, полученные при выполнении госзадания № 122040500036-9.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е.В. 1970. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ. 490 с.  
Большаков А.Ф. 1975. Изменение почвообразовательного процесса в солончаковых солонцах при искусственном нарушении их профиля // Почвоведение. № 10. С. 86-95.  
Борисов А.В., Алексеев А.О. 2020. К вопросу о времени и причинах возникновения солонцового процесса в

- почвах пустынных степей юго-востока Русской равнины // Аридные экосистемы. Т. 26. № 1 (82). С. 33-42. [A.V. Borisov, Alekseev A.O. 2020. Timing and Causes of the Origin of the Solonetz Process in the Desert-Steppe Soils of the Southeastern Russian Plain // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 1. P. 27-35.]
- Борисов А.В., Идрисов И.А., Пинской В.Н., Потанова А., Бухонов А.В., Ельцов М.В. 2023. Структура почвенного покрова и свойства почв пастбищ сухостепной зоны в условиях разной интенсивности выпаса // Аридные экосистемы. Т. 29. № 3 (96). С. 131-140. [Borisov A.V., Idrisov I.A., Pinskoy V.N., Potapova A., Bukhonov A.V., Eltsov M.V. 2023. Soil Cover Structure and Pasture Soil Properties in a Dry Steppe Zone under Conditions of Different Grazing Intensities // Arid Ecosystems. Vol. 13. No. 3. P. 348-356.]
- Генезис и мелиорация почв солонцовых комплексов. 2008 / Ред. Н.П. Панова. М.: Россельхозакадемия. 316 с.
- Егоров В.В. 1967. Солевые аномалии в профиле степных солонцов и их причина // Почвоведение. № 5. С. 108-114.
- Залибеков З.Г. 1982. Изучение почвенного покрова при интенсификации антропогенного воздействия // Почвоведение. № 10. С. 54-60.
- Иванова Е.Н. 1976. Классификация почв СССР. М.: Наука. 227 с.
- Котенко М.Е. 1993. Некоторые изменения светло-каштановых почв Терско-Сулакской низменности при различных пастбищных нагрузках // Почвоведение. № 4. С. 108-111.
- Лебедева Н.В., Ильина Л.П., Пономарёв А.В., Савицкий Р.М. 2011. Влияние пастбищной нагрузки на трансформацию сухостепных экосистем в долине Маныча // Аридные экосистемы. Т. 17. № 4 (49). С. 83-94.
- Любимова И.Н., Горобец А.В., Аксенов А.В., Хан В.В. 2012. Сравнение двух способов оценки условий развития осолонцевания в целинных и антропогенно-преобразованных почвах сухостепной зоны // Почвоведение. № 5. С. 594.
- Минкин М.Б., Бабушкин В.М., Садименко П.А. 1980. Солонцы юго-востока Ростовской области. Ростов-на Дону: Изд-во Ростовского университета. 271 с.
- Di Bella C., Jacobo E., Golluscio R., Rodriguez A. 2014. Effect of Cattle Grazing on Soil Salinity and Vegetation Composition along an Elevation Gradient in a Temperate Coastal Salt Marsh of Samborombó'n Bay (Argentina) // Wetlands Ecology Management. Vol. 22. P. 1-13.
- Donkor N., Gedir J., Hudson R., Bork E., Chanasyk D., Naeth M. 2002. Impacts of Grazing Systems on Soil Compaction and Pasture Production in Alberta // Canadian Journal of Soil Science. Vol. 82 (1). P. 1-8.
- Greenwood K., McKenzie B. 2001. Grazing Effects on Soil Physical Properties and the Consequences for Pastures: A Review // Australian Journal of Experimental Agriculture. Vol. 41 (8). P. 1231-1250.
- Hancock G., Ovenden M., Sharma K., Rowlands W., Gibson A., Wells T. 2020. Soil Erosion – The Impact of Grazing and Regrowth Trees // Geoderma. Vol. 361. P. 114102.
- Lavado R.S., Taboada M.A. 1987. Soil Salinization as an Effect of Grazing in a Native Grassland Soil in the Flooding Pampa of Argentina // Soil Use and Management. Vol. 3(4). P. 143-148.
- Pulido M., Schnabel S., Contador J., Lozano-Parra J., González F. 2018. The Impact of Heavy Grazing on Soil Quality and Pasture Production in Rangelands of SW Spain // Land Degradation and Development. Vol. 29. Issue 2. P. 219-230.

УДК 631.962; 630\*561.24

**ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНОГО РОСТА ДЕРЕВЬЕВ  
ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЛОС СУХОЙ СТЕПИ**

© 2024 г. А.А. Шигимага, Н.И. Быков, Н.В. Рыгалова

*Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН*

*Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1.*

*E-mail: anettshigimaga@mail.ru, nikolai\_bykov@mail.ru, natalia.ml@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2024. После доработки 01.06.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

В работе представлены дендрохронологический и дендроклиматический анализы радиального роста деревьев полезащитных лесных полос сухостепной подзоны. В условиях сухой степи деревья лесных полос очень чутко реагируют на изменения климата и вынуждены приспосабливаться к экстремальным условиям, что непосредственно влияет на их годичный прирост. Радиальный рост деревьев и их реакция на климатические факторы определяются их породным составом и географическим положением в пределах сухой степи. Скорости радиального роста значительно дифференцированы по породам. Наибольший прирост наблюдается у тополей. Лиственничные хронологии отличаются наименьшими темпами радиального роста. Наиболее чувствительными к климатическим колебаниям являются березовые хронологии, а наименее – сосновые. Отмечена статистически значимая связь с осадками, температурой, показателем увлажнения территории (с гидротермическим коэффициентом Селянинова), а также с индексом суровости засухи Палмера (sc-PDSI). Дефицит осадков и повышение температуры воздуха чаще всего вызывают снижение величины прироста древесины. Отмечено большое количество узких, выклинивающихся и выпадающих реперных колец. Анализ возрастной структуры изученных деревьев лесополос показал, что они переходят в сенильную стадию развития. Дальнейшее усиление аридизации климата будет неизбежно влиять на рост деревьев лесополос и создаст дополнительные риски их существования.

*Ключевые слова:* полезащитные лесные полосы, сухая степь, годичные кольца, радиальный прирост, древесно-кольцевые хронологии, дендроклиматический анализ.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-78-88**

**EDN: RXMXZC**

Подзона сухой степи, которая распространена небольшими участками преимущественно в южных регионах Российской Федерации, характеризуется недостаточным увлажнением, высокой интенсивностью ветров и частой повторяемостью засух (Сляднев, Фельдман, 1958). Ее сельскохозяйственное освоение потребовало принятия мер по созданию полезащитных лесных полос. Наиболее масштабные работы по их возведению велись в России в 1940-1980 гг. (Родин и др., 2014). В пределах Алтайского края в сухой степи было создано более 24 тыс. га лесных полос (Кукис, Горин, 1973; Парамонов, 2012). Они способствовали улучшению микроклимата сельскохозяйственных полей, прежде всего, за счет уменьшения скорости ветра, увеличения снегонакопления и сохранению влаги на полях. Это в целом способствовало увеличению урожайности сельскохозяйственных выращиваемых здесь культур на 30-40%, по оценкам некоторых исследователей (Ишутин, 2005; Ишутин и др., 2005; Кукис, 1951; Парамонов, Ишутин, 2009, Парамонов и др., 2017). Кроме своего важного сельскохозяйственного значения лесные полосы также играют ключевую роль в экологическом аспекте, формируя биоразнообразие территории (Абакумов и др., 1986; Мильков, 1978).

Современное и будущее их существование в значительной мере обусловлено как климатическими изменениями, так и хозяйственной деятельностью человека. Социально-экономические изменения, начавшиеся в Российской Федерации в 1990-х гг., создали негативные условия для их воспроизводства и в итоге привели к сокращению их площадей. Изменение климата, вероятно, также способствует ухудшению условий роста деревьев лесных полос.

Однако широко применяемые таксационные методы исследования лесополос выполняются через определенные временные промежутки, что не позволяет проследить влияние климатических факторов на рост деревьев (в т.ч. радиальный). В связи с этим целесообразным представляется применение дендроклиматического метода для анализа реакции деревьев на климатические изменения. Данный метод основывается на анализе данных о ширине колец годичного прироста деревьев и других параметрах (Kaennel, Schweingruber, 1995).

В области дендроклиматических исследований лесных полос имеется значительный пробел, поскольку дендрохронологический и дендроклиматический анализ применяется в основном к естественным лесным насаждениям. Однако в провинции Саскачеван (Канада), которая также отличается недостаточным увлажнением (McGinn, 2010), были выполнены работы по оценке пригодности различных видов деревьев лесополос для дендрохронологических и дендроклиматических целей (Davis et al., 2013). Также был проведен анализ устойчивости различных пород деревьев лесополос к засухам, например, ясеня пенсильванского (*Fraxinus pennsylvanica* Marshall) и ели сизой (*Picea glauca* (Moench) Voss). Его результаты показали, что периодические засухи являются основным ограничивающим рост дерева фактором, а наиболее устойчивым к засухам оказался ясень (Maillet et al., 2017). Дополнительно была изучена реакция на засуху трех различных видов лесополос. Анализ показал, что сильнее и экстремальные трехмесячные засухи оказывают наибольшее воздействие на деревья, причем сосна и ель восстанавливаются быстрее, чем ясень (Canning et al., 2023).

Вследствие того, что лесополосы остаются малоизученными в контексте дендрохронологического и дендроклиматического анализа, в нашей работе были поставлены следующие исследовательские задачи: 1) исследовать особенности радиального прироста различных пород ползащитных лесных полос сухой степи; 2) выполнить дендроклиматический анализ древесных растений ползащитных лесных полос сухой степи в пределах Алтайского края.

### Материалы и методы

Исследование по оценке радиального роста деревьев ползащитных лесных полос было выполнено на территории сухостепной подзоны Кулунды, которая, согласно физико-географическому районированию, принадлежит Западно-Кулундинской подпровинции, расположенной на западе Алтайского края (Алтайский край: атлас, 1978). Данная территория представляет собой типичную пролювиальную-аллювиальную равнину. Наибольшее распространение здесь получили низменные дренированные сухостепные плоские и плосковолнистые аллювиальные супесчаные и песчаные равнины на каштановых и темно-каштановых почвах. Кроме того, повсеместно небольшими островками представлены низинные слабодренированные солонцово-степные низкие супесчано-суглинистые озерные и речные территории на каштановых и темно-каштановых солонцеватых почвах (Герасимов, 1935). Растительный покров сложен преимущественно из многолетних микротермных и ксерофильных травяных растений, большей частью дерновинных злаков (Дударева и др., 2008). Характерной чертой здесь является континентальность климата, малоснежность, частая повторяемость сухих лет и неравномерное распределение осадков в течение года (Сляднев, Фельдман, 1958).

В качестве объектов исследования на территории сухостепной подзоны были выбраны деревья 22 ползащитных лесных полос (рис. 1). При выборе участков учитывалась близость относительно метеорологической сети, а также разнообразие древесных пород, составляющих ползащитные лесные полосы. В каждой лесополосе отбирались древесные керны с 15 здоровых, прямостоящих деревьев. При помощи возрастного бурава Haglof с каждого дерева было получено по 2 радиуса на высоте ~1.3 м. В некоторых лесных полосах с целью оценки скорости вертикального роста были дополнительно отобраны образцы на разных высотах. Отбор и обработка образцов выполнялись согласно общепринятой методике (Шиятов и др., 2000).

Древесный состав исследуемых лесополос представлен березой повислой (*Betula pendula* Roth.), тополем бальзамическим (*Populus balsamifera* L.), лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ldb.), сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.; табл. 1).

Измерение и анализ древесных кернов проводился при помощи специального оборудования LINTAB 6 и программного обеспечения TSAP (Rinn, 1996), программы пакета DPL.

Проверка качества измерений была проведена в программе COFECNA (Holmes, 1983). Стандартизация и построение обобщенных древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) выполнена в программе ARSTAN (Cook, Krusic, 2005). В качестве аппроксимирующих кривых были выбраны линейный тренд, негативная экспонента и кубический сплайн, которые подбирались в соответствии с особенностями ДКХ.

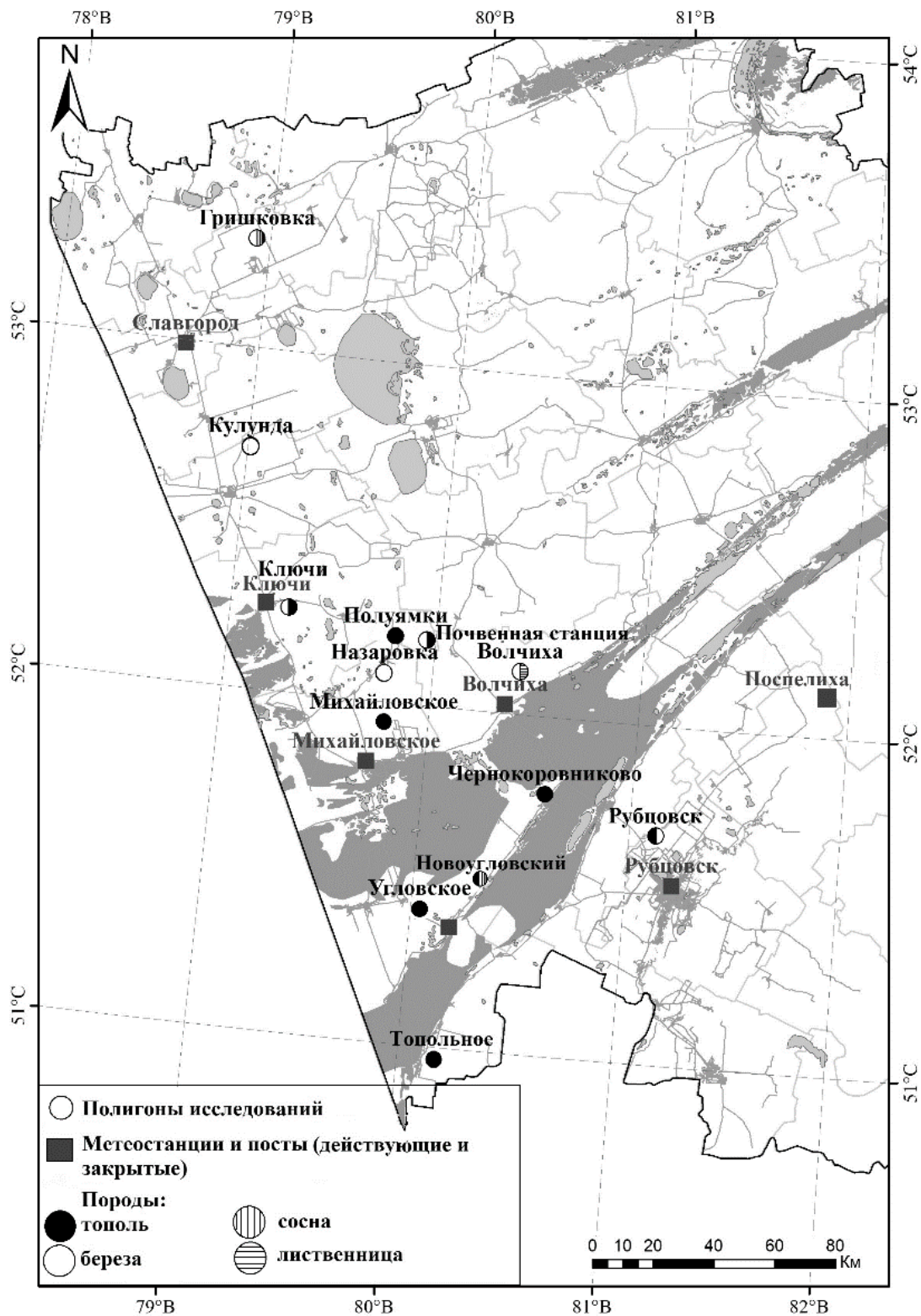


Рис. 1. Территория исследования.

Таблица 1. Средние показатели индивидуальных хронологий.

Название хронологии	Период	Среднее число лет в хронологиях	Средний радиус, мм	Средний годичный прирост, мм	Порода
Ключи	1969-2018	45.2	99.3	2.2	Береза
Ключи	1969-2019	41.8	132.6	3.2	Тополь
Назаровка	1975-2018	38.8	99.9	2.6	Береза
Назаровка 2	1979-2021	37.3	109.3	2.9	Береза
Ащигуль	1965-2021	43.4	100.5	2.3	Береза
Рубцовск	1965-2018	50.0	128.7	2.6	Береза
Рубцовск	1947-2019	65.4	224.1	3.4	Тополь
Почвенная станция	1949-2018	51.1	163.4	3.2	Тополь
Почвенная станция	1975-2019	40.3	109.5	2.7	Береза
Полуямки	1950-2019	56.3	202.6	3.6	Тополь
Михайловское	1979-2018	34.9	116.5	3.3	Тополь
Угловское	1972-2018	37.9	130.8	3.5	Тополь
Новоугловский	1971-2018	38.4	138.0	3.8	Тополь
Новоугловский	1979	38.9	149.1	3.9	Сосна
Волчиха	1961-2018	54.9	65.2	1.2	Лиственница
Волчиха	1947-2019	61.9	93.2	1.5	Береза
Поспелиха	1975-2018	39.4	112.7	2.9	Лиственница
Поспелиха	1979-2019	26.7	127.6	5.0	Береза
Чернокоровниково	1967-2020	45.5	156.3	3.4	Тополь
Топольное	1971-2020	48.4	208.7	4.3	Тополь
Кулунда	1971-2020	46.5	90.8	2.0	Береза
Гришковка	1978-2020	41.1	151.8	3.7	Сосна
Гришковка	1975-2020	41.6	123.7	3.0	Береза

У полученных индивидуальных хронологий по каждому дендрополигону проверялся так называемый единый популяционный сигнал EPS (англ. «Expressed Population Signal»), который свидетельствует о том, насколько полученная выборка хронологий отражает генеральную выборку и могут ли данные хронологии быть использованы для построения обобщенной хронологии конкретного дендрополигона (Wigley et al., 1984).

Стандартизированные обобщенные ДКХ были проверены на предмет наличия в них климатического сигнала. Наличие сигнала отражает коэффициент чувствительности, который дает оценку колебаний величины индексов прироста от года к году, т.е. показывает степень воздействия внешних факторов на изменение величины прироста. Пороговым значением чувствительности древесно-кольцевых серий принято среднее значение коэффициента 0.2 (Ваганов и др., 1996).

Для проведения анализа между приростом и климатическими параметрами использовались данные среднесуточных температур и месячные суммы осадков ближайших метеостанций. Взаимосвязь между приростом ДКХ и климатическими определялась с помощью расчета коэффициентов корреляции Пирсона.

Помимо этого была изучена зависимость прироста с индексом суровости засухи Палмера (sc-PDSI). Для этого были получены данные сеточного архива CRU TS 4.06 в координатной сетке  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , представленные центром климатических исследований Великобритании за период с 1900 по 2021 годы (Harris et al., 2020).

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования показали, что возраст самых длительных индивидуальных ДКХ по всем участкам варьирует от 39 до 73 лет, а самых коротких – от 14 до 51 года. Средний возраст

исследованных деревьев на участках изменяется от 34.9 до 65.4 лет, а также меняется в соответствии с породным составом: у березы – от 37.3 до 61.9, тополя – 34.9-65.4, лиственницы – 54.9, сосны – 38.9-41.1 (табл. 1). Деревья в каждой лесополосе одного возраста, в связи с чем коэффициенты вариации возраста деревьев на участках достаточно низкие (от 0.04 до 0.18), а их различия обусловлены разной скоростью вертикального роста деревьев.

Средняя ширина годичных колец значительно варьирует в зависимости от породного состава лесополосы и от географического расположения в пределах сухой степи. Среди всех индивидуальных хронологий этот показатель изменяется от 1.0 до 7.9 мм: у березы – 1.3-7.9, тополя – 1.9-5.4, лиственницы – 1.0-3.5, сосны – 2.3-5.6. А по участкам данные колеблются от 1.2 до 4.3 мм, в т.ч. у березы – 1.5-3.0 мм, тополя – 3.2-4.3, лиственницы – 1.2, сосны – 3.7-3.9 мм. Коэффициент вариации средней ширины годичного кольца индивидуальных хронологий на участках изменяется от 0.13 до 0.37, в т.ч. по березовым хронологиям – 0.13-0.37, тополевым – 0.17-0.30, лиственничным – 0.18. Отмечается зависимость средней ширины прироста от среднего возраста хронологий на участках, что указывает на присутствие возрастного тренда в радиальном росте исследуемых деревьев.

Таким образом, наиболее высокую скорость роста в сухой степи демонстрируют тополь и сосна, а затем береза. Лиственничные хронологии отличаются наименьшими темпами роста. При анализе пар хронологий различных пород на одном участке выявлено, что тополь приблизительно на 30% опережает в скорости прироста березу, в то время как береза превосходит лиственницу на 25-40%. Сосна и тополь имеют сходные показатели в скорости радиального роста. У тополя наблюдается четко выраженная тенденция увеличения средней ширины годичного кольца в юго-западном направлении, что, вероятно, указывает на влияние климатических и географических особенностей данного направления на процессы роста и развития тополей. Подобная тенденция также присутствует у березы, однако менее выражено.

Проведенный анализ скорости вертикального роста деревьев показал значительные различия по породам. Среди проанализированных пород тополь обладает наибольшей скоростью вертикального роста: его прирост с 80 см до 120 см происходит в среднем за один год. Березовые хронологии демонстрирует более медленный рост, равный 2-3 годам. Самым медленным вертикальным ростом характеризуются хронологии сосны – 5 лет.

Одной из характерных особенностей роста древесных растений, произрастающих в экстремальных климатических условиях, являются реперные годы, которые представляют собой совокупность перекрестно датированных особых лет (т.е. лет с резко выраженными особенностями), выделенных для группы деревьев. В качестве реперных лет могут выступать кольца: очень узкие, ложные, выпавшие, светлые, морозобойные (Гишин, Чижикова, 2018).

Для проанализированных деревьев полезащитных лесных полос, наиболее часто встречающимся индикатором экстремальных событий выступают выпавшие кольца, а также заметные снижения прироста, когда формировались так называемые узкие реперные кольца. Наибольшая встречаемость таких лет наблюдается в 2012, 2008, 2007, 2003, 1999, 1997, 1994, 1988, 1982, 1977, 1974, 1973, 1963, 1955, 1951 гг. Данная тенденция связана с засушливыми периодами, которые имели место в указанные годы на исследуемой территории (Харламова, 2013).

Показатели коэффициента чувствительности варьируют от 0.18 до 0.5 (табл. 2). Наиболее чувствительной к колебаниям климата оказалась береза, затем лиственница и тополь, а наименее – сосна. А в группах тополевых и березовых хронологий отмечается повышение чувствительности хронологий в северо-восточном направлении. Чувствительность березовых хронологий изменяется в пределах ландшафтных катен: наибольшей отличаются березовые хронологии плакорных местоположений, а наименьшей – субкавальных участков.

Сопоставив данные древесно-кольцевых хронологий с количеством осадков и температурой, можно отметить, что взаимосвязь между радиальным приростом и среднемесячным количеством осадков выражена более отчетливо (рис. 2). Связи прироста с осадками преимущественно положительные, а значит, влага способствует увеличению прироста древесины в условиях сухой степи, и, напротив, дефицит увлажнения вызывает уменьшение радиального прироста.

В северной части исследуемой территории в вегетационный период наиболее значимы осадки мая и июня, в средней – за периоды апрель-август и май-август, а в южной части все деревья полезащитных лесополос положительно реагируют на осадки июля в первую очередь и августа.

**Таблица 2.** Единый популяционный сигнал (EPS) абсолютных ДКХ и чувствительность обобщенных стандартизированных ДКХ.

Дендрополигон	Тополь		Береза		Сосна		Лиственница	
	EPS*	Чувствительность обобщенных ДКХ**	EPS	Чувствительность обобщенных ДКХ	EPS	Чувствительность обобщенных ДКХ	EPS	Чувствительность обобщенных ДКХ
Гришковка			0.98	0.28	0.98	0.22		
Кулунда			0.99	0.41				
Ключи	0.94	0.28	0.98	0.41				
Почвенная станция	0.99	0.30	0.97	0.35				
Полюямки	0.98	0.29						
Назаровка			0.98	0.33				
Назаровка 2			0.98	0.19				
Ащигуль			0.99	0.34				
Михайловское	0.97	0.23						
Волчиха			0.93	0.33			0.99	0.31
Рубцовск	0.98	0.35	0.99	0.35				
Угловское	0.95	0.29						
Новоугловский	0.97	0.23			0.98	0.24		
Чернокоровниково	0.99	0.31						
Топольное	0.99	0.21						

Взаимосвязь между среднемесячной температурой воздуха и радиальным приростом имеет обратную зависимость: повышение температуры вызывает снижение величины прироста древесины. Это объясняется возникновением неблагоприятных условий роста при повышении температуры: снижается влажность почвы, формируется дефицит влаги.

Как правило, отрицательное воздействие оказывает повышение температуры в вегетационный период, начиная с апреля. При этом у северных хронологий наиболее значимыми оказываются июнь и июль, а у южных – май и июнь.

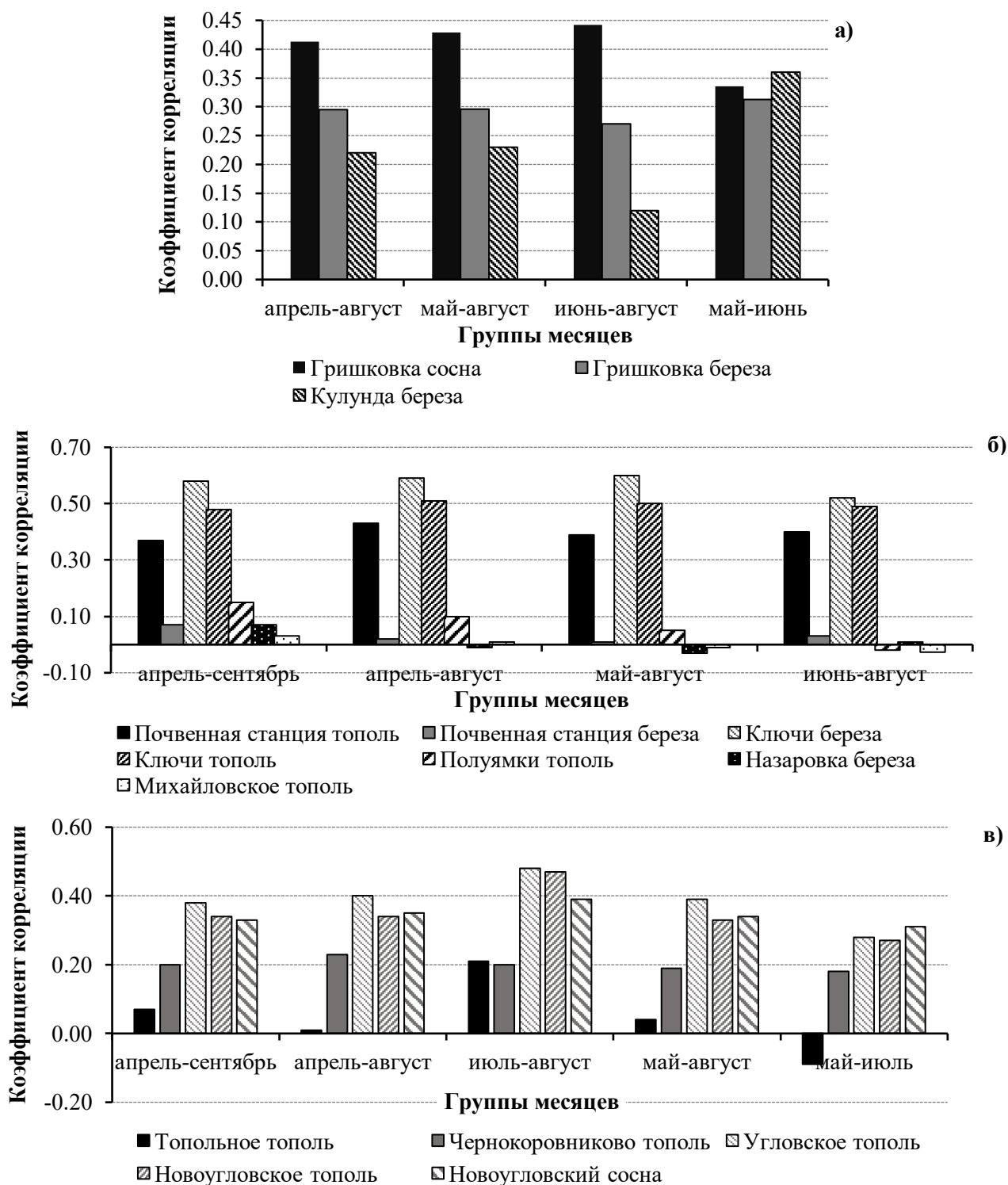
Также был проведен анализ корреляционной зависимости древесно-кольцевых хронологий от ГТК Селянинова. Диапазон значений – 0.23-0.74 (табл. 3), что указывает на значимость совокупного фактора тепла и влаги для роста деревьев в сухой степи. К увлажнению оказались наиболее чувствительны сосна и береза, а менее чувствительны тополь и лиственница.

Обнаружена значимая зависимость между радиальным приростом деревьев и индексом суровости засухи Палмера (scPDSI) на большинстве исследуемых участков. Однако по лиственничным дендрополигонам существенной зависимости от уровня сухости (scPDSI) не установлено. Максимальные коэффициенты корреляции по всем березовым и тополевым полигонам отмечаются в июне и июле. Анализируя коэффициенты корреляции между приростом и индексом scPDSI по временным периодам, можно отметить, что наиболее высокая взаимосвязь наблюдается в июне-августе и мае-августе, в то время как связь за весь период вегетации немного ниже (рис. 3). Топольные дендрополигоны демонстрируют увеличение зависимости от индекса сухости в северо-восточном направлении. Сосновые хронологии показывают высокую зависимость прироста от совокупного индекса сухости только в северной части исследуемой территории.

### Выводы

Полученные результаты показывают, что радиальный прирост деревьев полезащитных лесополос сухой степи и их реакция на климатические факторы определяется их породным составом и географическим положением. Скорости радиального роста значительно дифференцированы по породам. Наибольший прирост наблюдается у тополей и сосен, а далее последовательно у берез и лиственниц. У тополей отмечается увеличение скорости роста в юго-западном направлении.

Анализ вертикального роста деревьев показал, что тополь обладает наибольшей скоростью среди анализируемых пород, в то время как сосна растет медленнее всего.



**Рис. 2 а-в.** Связь индексов приростов древесных растений с температурой и суммами атмосферных осадков за отдельные периоды: а) связь индексов приростов древесных растений и сумм атмосферных осадков на метеостанции «Славгород» за отдельные периоды, б) связь индексов приростов древесных растений и сумм атмосферных осадков на метеостанции «Ключи» за отдельные периоды, в) связь индексов приростов древесных растений и сумм атмосферных осадков на метеостанции «Угловское» за отдельные периоды.

Продолжение рисунка 2.

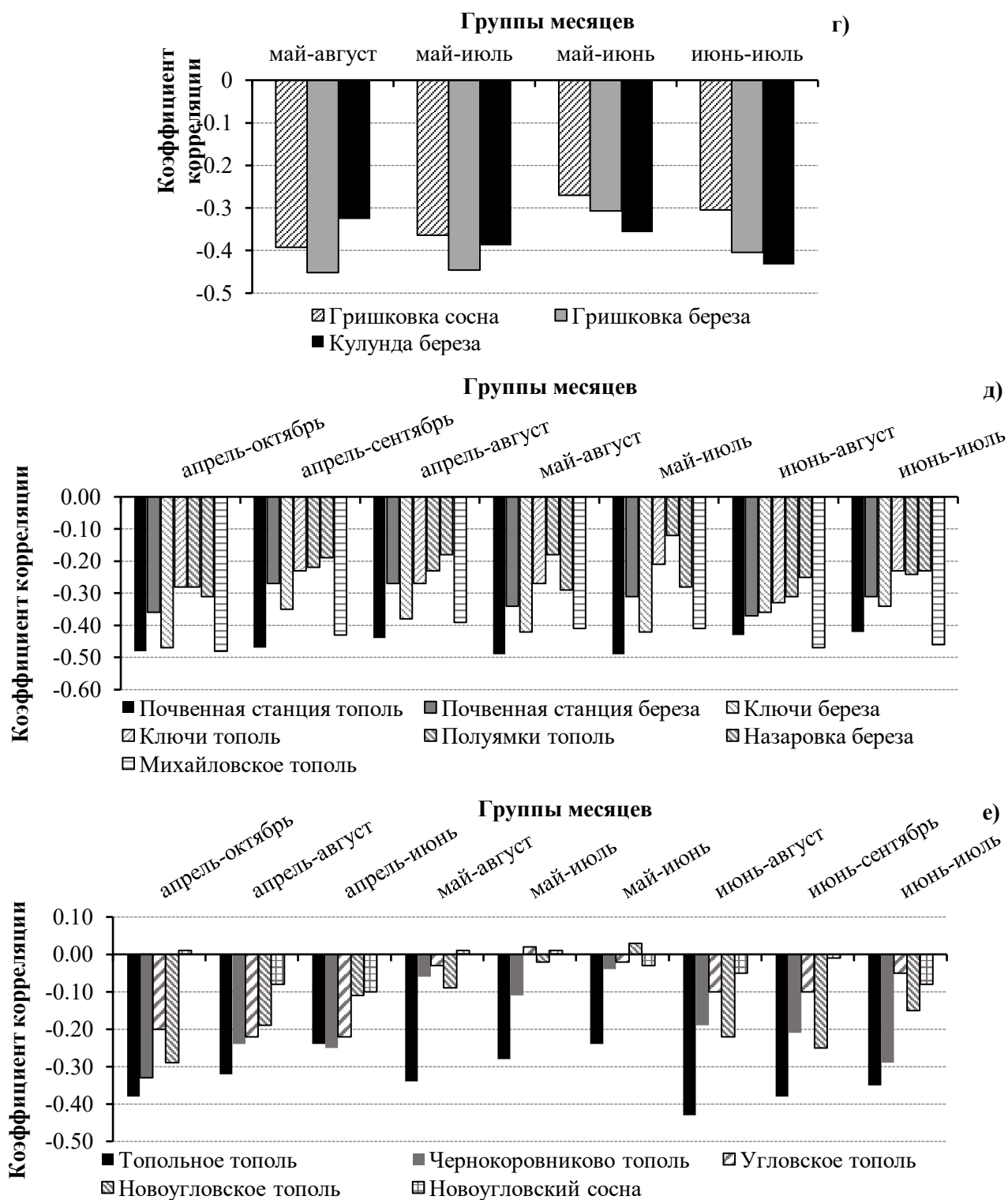
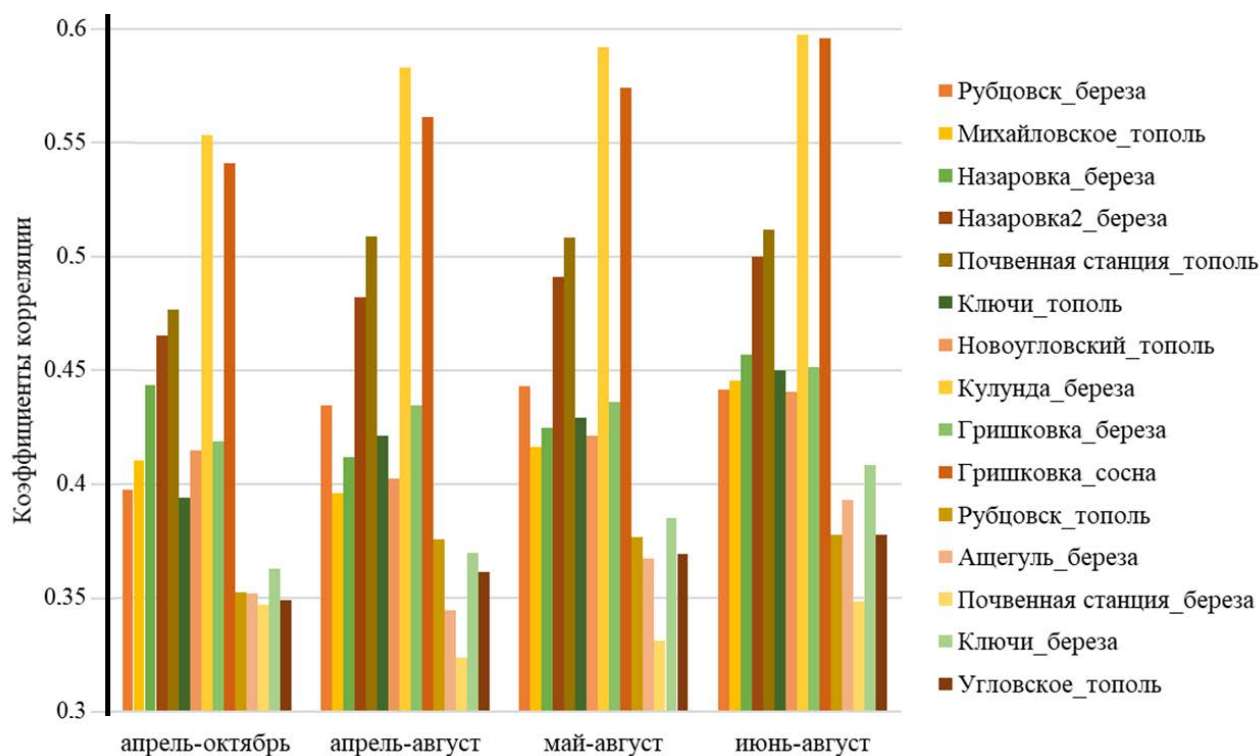


Рис. 2 г-е. Связь индексов приростов древесных растений с температурой и суммами атмосферных осадков за отдельные периоды: г) связь средней температуры воздуха за определенные периоды на метеостанции «Славгород» с индексами приростов годовых колец, д) связь средней температуры воздуха за определенные периоды на метеостанции «Ключи» с индексами приростов годовых колец, е) связь средней температуры воздуха за определенные периоды на метеостанции «Угловское» с индексами приростов годовых колец.

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции индексов обобщенных хронологий и ГТК Селянинова по метеостанции Рубцовск/Славгород за 1989-2018 гг.

Название хронологии	Порода	Коэффициент корреляции	Название хронологии	Порода	Коэффициент корреляции
Гришковка	Сосна	0.42/0.44	Полуямки	Тополь	0.23/0.24
Гришковка	Береза	0.29/0.18	Михайловское	Тополь	0.41/0.58
Кулунда	Береза	0.44/0.40	Волчиха	Лиственница	0.34/0.14
Ключи	Береза	0.67/0.34	Волчиха	Береза	0.60/0.32
Ключи	Тополь	0.41/0.42	Угловское	Тополь	0.37/0.28
Назаровка	Береза	0.30/0.39	Новоугловский	Тополь	0.33/0.21
Назаровка 2	Береза	0.59/0.32	Новоугловский	Сосна	0.74/0.38
Ащигуль	Береза	0.50/0.32	Чернокоровниково	Тополь	-0.01/0.17
Почвенная станция	Тополь	0.28/0.54	Почвенная станция	Береза	0.23/0.46
Рубцовск	Береза	0.61/0.32	Топольное	Тополь	0.11/0.42
Рубцовск	Тополь	0.28/0.40			



**Рис. 3.** Связь индексов прироста древесных растений и индекса суровости засухи Палмера (sc-PDSI) по периодам.

Рост и развитие деревьев полезащитных лесных полос в сухой степи сильно зависит от климатических условий. Дефицит влаги и высокая температура воздуха являются основным ограничивающим его фактором. Отмечена высокая зависимость прироста от совокупного индекса суровости засухи Палмера, а также от ГТК Селянинова.

Наблюдается значительная вариабельность чувствительности к изменениям климата в зависимости от породы. Береза и лиственница оказались более чувствительными к колебаниям климата, в то время как сосна и тополь проявляют более низкую чувствительность, а значит, являются более устойчивыми породами в условиях сухой степи. Экстремальные условия

окружающей среды обусловили наличие реперных колец у деревьев, среди которых выпавшие и очень узкие кольца, формирование которых происходило в засушливые периоды.

Средний возраст исследованных деревьев многих исследованных участков превышает 40 лет, а некоторых 60 лет. Это означает, что деревья в них близки к синильной стадии своего развития, т.е. являются ослабленными. При дальнейшем усилении аридизации климата это создаст дополнительные риски их существования.

Полученные результаты могут иметь практическое значение при проектировании полезащитных лесных полос и подборе породного состава, а также при разработке стратегий адаптации к изменениям климата, что важно для устойчивого управления природными ресурсами и сохранения биоразнообразия в экосистемах сухих степей.

*Финансирование.* Исследование выполнено в рамках госзадания № FUFZ-2021-0007 Института водных и экологических проблем СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов Б.А., Бабенко Д.К., Бертнев И.М.* 1986. Защитное лесоразведение в СССР / Ред. Е.С. Павловский. М.: Агропромиздат. 263 с.
- Алтайский край: атлас. 1978. Т. 1. М.-Барнаул: ГУГК. 203 с.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С.* 1996. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Сибирская издательская фирма РАН. 246 с.
- Герасимов И.П.* 1935. Материалы к геоморфологии Кулундинской степи // Труды СОПС СН СССР. Серия Сибирская. Вып. 10. С. 9-34.
- Дударева О.Н., Ермакова Л.И., Забровская З.А., Мальцева Т.Г., Пожарская К.А., Разгон В.Н.* 2008. Кулундинский район // Кулундинский район: страницы истории и современность. № 5-6. 28 с.
- Иишутин Я.Н.* 2005. Лесополосы в Кулундинской степи: монография. Барнаул: Изд-во Алтайского университета. 160 с.
- Иишутин Я.Н., Парамонов Е.Г., Стояцева Н.В.* 2005. Лесные экосистемы в экологическом каркасе Кулундинской степи // Ползуновский вестник. № 4. С. 83-88.
- Кукис С.И.* 1951. Полезащитное лесоразведение в Алтайском крае. Барнаул: Алтайская Правда. 31 с.
- Кукис С.И., Горин В.И.* 1973. История защитного лесоразведения в Алтайском крае // Опыт полезащитного лесоразведения на Алтае. Барнаул: Алтайское книжное изд-во. С. 13-71.
- Мильков Ф.Н.* 1978. Рукотворные ландшафты. М.: Мысль. С. 90.
- Парамонов Е.Г.* 2012. Итоги инвентаризации защитных лесных насаждений в Алтайском крае // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. № 8 (94). С. 58-62.
- Парамонов Е.Г., Менжулин И.Д., Иишутин Я.Н.* 2017. Лесное хозяйство Алтая. 2-е изд., знач. доп. Барнаул: Изд-во АГУ. 392 с.
- Парамонов Е.Г., Иишутин Я.Н.* 2009. Лесополосы как фактор улучшения экологической обстановки в степной Кулунде // Сибирский экологический журнал. № 5. С. 687-691.
- Родин А.Р., Родин С.А., Васильев С.Б., Силаев Г.В.* 2014. Лесомелиорация ландшафтов: учебник / Ред. А.Р. Родин. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ. 192 с.
- Сляднев А.П., Фельдман Я.И.* 1958. Важнейшие черты климата Алтайского края (без Горно-Алтайской АО) // Природное районирование Алтайского края. Т. 1.: Труды комплексной экспедиции. М.: Изд-во АН СССР. С. 210.
- Тишин Д.В., Чижикова Н.А.* 2018. Дендрохронология. Казань: Казанский университет. 34 с.
- Харламова Н.Ф.* 2013. Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона. Барнаул: Алтайский государственный университет. 156 с.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М.* 2000. Методы дендрохронологии. Ч. I. Красноярск: Изд-во КрасГУ. 80 с.
- Canning C.M., Mood B.J., Bonsal B., Howat B., Laroque C.P.* 2023. Comparison of Tree-Growth Drought Legacies of Three Shelterbelt Species in the Canadian Prairies // Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 330. P. 109317.
- Cook E.R., Krusic P.J.* 2005. Program ARSTAN: A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics. Palisades, N.Y.: Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University. 14 p.
- Davis E.L., Laroque C.P., Van Rees K.* 2013. Evaluating the Suitability of Nine Shelterbelt Species for Dendrochronological Purposes in the Canadian Prairies // Agroforestry Systems. No. 87. P. 713-727.
- Kaennel M., Schweingruber F.H.* 1995: Multilingual Glossary of Dendrochronology. Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese, and Russian. Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt: Birmensdorf,

Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. 467 p.

*Maillet J., Laroque C., Bonsal B.* 2017. A Dendroclimatological Assessment of Shelterbelt Trees in a Moisture Limited Environment // *Agricultural and Forest Meteorology*. P. 30-38.

*McGinn S.M.* 2010. Weather and Climate Patterns in Canada's Prairie Grasslands // *Arthropods of Canadian Grasslands*. Vol. 1. Canada: Biological Survey of Canada. P. 105-119.

*Rinn F.* 1996. TSAP V3.5. Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution. 264 p.

*Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D.* 2020. Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset // *Scientific Data*. Vol. 7. Article No. 109.

*Holmes R.L.* 1983. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement // *Tree-Ring Bulletin*. Vol. 43. No. 3. P. 69-78.

*Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D.* 1984. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. Vol. 23. P. 201-213.

**ФИТОЦЕНОТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КОРМОВАЯ ЦЕННОСТЬ  
ЛЮЦЕРНОВЫХ ПАСТБИЩ ВОСТОЧНОГО ЧИНКА УСТЮРТА**

© 2024 г. У.Ш. Саитжанова, Х.Ф. Шомуродов

Институт ботаники АН Республики Узбекистан

Узбекистан, 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, д. 32. E-mail: spring\_girl93@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024. После доработки 01.08.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

В статье представлена эколого-фитоценотическая характеристика люцернового (*Medicago sativa*) типа пастбищ, распространенных на территории Восточного чинка Каракалпакского Устюрта (Узбекистан). Охарактеризован видовой состав, урожайность пастбищных разностей, тип почвы, процент проективного покрытия травостоя, ландшафтные виды, определена рекомендуемая сезонность использования. По геоботаническому районированию люцерновый тип пастбищ охватывает небольшие участки, сосредоточенные в межбугорных понижениях с близким стоянием грунтовых вод, отмечены на массивах Кабанбай, Актумсук, Кассарма, Каракудук, Акбулак. Распространён от первой до второй террас чинка и занимает территорию между мысами Урга и Байгубекмурун и занимает 202 гектара. Данный тип состоит из трех пастбищных разностей: полынно-пырейно-люцерновая (*Medicago sativa*, *Agropyron fragile*, *Artemisia diffusa*), пырейно-люцерновая (*Medicago sativa*, *Agropiron fragile*) и чёрнокорнево-люцерновая (*Medicago sativa*, *Cynoglossum viridiflorum*), распространенных на суглинистых и серо-бурых почвах. Сезонная урожайность кормовой массы колеблется от 0.4 до 1.3 ц/га. По результатам исследования, изученные пастбищные разности рекомендуют использовать как круглогодичные пастбища.

**Ключевые слова:** *Medicago sativa*, кормовая ценность, Восточный чинк, Устюрт, фитоценоз, урожайность, сезонность использования.

**DOI:** 10.24412/1993-3916-2024-4-89-95

**EDN:** RRZMCSJ

Главным источником корма для крупного и мелкого рогатого скота являются пустынные пастбища. Естественные пастбища Средней Азии занимают 200 млн. га. Для совершенствования животноводства пастбища являются основным источником корма в очень крупных объёмах. Растительность имеет скудный и разреженный характер, но, тем не менее, пустыни дают корма для скота в течение всего года (Шамсутдинов, Шамсутдинова, 2015).

Растительные сообщества и пастбища Средней Азии были изучены уже многими авторами (Нечаева, Приходько, 1966; Гаевская и др., 1958; Зарипов и др., 1972; Хасанов и др., 2000; Бобокулов и др., 2014; Шомуродов, 2018; Adilov et al., 2021; Rakhimova, Rakhimova, 2022; Sharipova et al., 2022; Rakhimova et al., 2023; Shomurodov et al., 2023).

Восточный чинк Устюрта представлен засушливой каменистой пустыней, состоящая из террас. На всём протяжении от мыса Актумсук и до Сарыкамыша он значительно расчленён оврагами, иногда далеко врезающимися в плато (Сарыбаев, 1981). Характеризуется следующими разновидностями почвы: серо-бурые, такырные, суглинистые, пустынно песчаные, солонцы пустынные, солончаки. Отличительной особенностью является малое содержание гумуса и засоленность (Клейменова, 2010).

Согласно Б. Сарыбаеву (1981), люцерновая формация (*Medicageta sativae*) относится к типу луговой растительности (Ligophyta), распространенной от I до II террасы Восточного чинка. Она занимает территорию между мысами Урга и Байгубекмурун, а также в окрестностях Кабанбая, мыса Актумсук. Акбулака и Каракудука. В Южно-Приморском подрайоне распространена пятнами по ложбинам. В Центрально-Приморском и Северо-Приморском подрайонах встречается на северных, северо-восточных и восточных склонах обрывов. Тип классифицировался на 4 ассоциации: разнотравно-люцерновая, пырейно-люцерновая, чернокорнево-люцерновая, выюнково-люцерновая.

Зелёная надземная масса люцерны – богатый протеином корм для всех видов сельскохозяйственных животных и птиц, превосходящий по содержанию протеина не только все злаковые, но и наиболее распространённые в культуре многолетние бобовые травы (Тарковский и др., 1964).

На сегодняшний день многие учёные сталкиваются с недостаточной изученностью пустынных пастбищ, а также их фитоценотической характеристики. Поэтому целью исследования являлось изучение эколого-фитоценотического состояния люцерновых пастбищ, произрастающих на территории Восточного чинка Устюрта, а также их кормовой ценности.

### Материалы и методы

Объектами данного исследования являются 3 пастбищные разности, относящиеся к люцерновому типу Восточного чинка Устюрта: полынно-пырейно-люцерновая (*Medicago sativa*, *Agropyron fragile*, *Artemisia diffusa*) на серо-бурых почвах, пырейно-люцерновая (*M. sativa*, *A. fragile*) на суглинисто-каменистых почвах и чёрнокорнево-люцерновая (*M. sativa*, *Cynoglossum viridiflorum*) на суглинистых почвах.

Изученный тип пастбищ занимает небольшую территорию в Восточном чинке Устюрта – 202 га. Основные площади расположены в Центрально-Приморском и Северо-Приморском подрайонах: Актумсук, Каракудук и Акбулак (рис. 1).

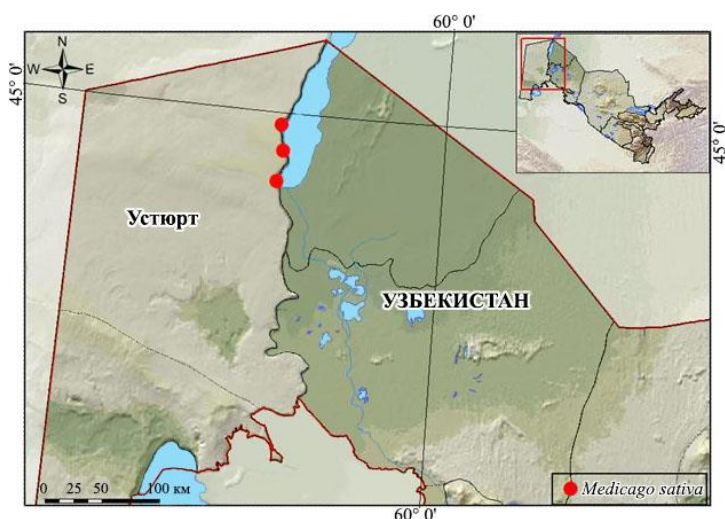


Рис. 1. Карта распространения изученных люцерновых пастбищных разностей Восточного чинка Устюрта.

Изучение пастбищной растительности проведено согласно общепринятым методам маршрутных полевых геоботанических и флористических исследований (Полевая геоботаника, 1964). Степень проективного покрытия определялась глазомерным способом (Раменский, 1971).

Наименование пастбищных типов и разностей, а также геоботанические данные, определение урожайности, установление пастбищных выделов проведено согласно «Методическому указанию по геоботаническому обследованию естественных кормовых угодий Узбекистана» (1980). Классификация пастбищ проведена согласно эколого-фитоценотической схеме классификации пастбищ, характерной для «Общесоюзной инструкции по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий и составлению крупномасштабных геоботанических карт» (1984). Динамика нарастания кормового и поедаемого запаса, определение питательной ценности, установление бонитета – по И.В. Ларину соавторами (1951) и В.Н. Николаеву с соавторами (1977).

Латинские названия видов растений приводятся по базе «Plants of the World Online» (2022), а координаты были получены с помощью программы ESRI ArcGIS ArcView v.10.6 (2024).

### Результаты и обсуждение

В ходе исследования 2020-2022 гг. на Восточном чинке были изучены 3 пастбищные разности, входящие в состав люцернового типа пастбищ.

Полынно-пырейно-люцерновая (*Medicago sativa*+*Agropyron fragile*–*Artemisia diffusa*) пастбищная

разность произрастает в Кунградском районе Республики Каракалпакстан. Основные ее площади расположены на Восточном чинке Устюрта, неподалёку от колодца Каракудук, от первой террасы до моря. Распространена в увлажнённых местах по днищам ущелий и обрывов. Произрастает на мелкоземистых, серо-бурых почвах. Встречается небольшими пятнами по склонам ущелий и сухим руслам весенних водотоков. Накопление в почве значительного количества азота и минеральных веществ резко увеличивает в почве общее количество микроорганизмов и особенно полезных для земледелия за счёт клубеньковых бактерий на корнях – азотфиксаторов. Видовой состав данной пастбищной разности беден, составляет всего 12 видов. Процент проективного покрытия пастбищной разности составляет 80%. При этом доля *M. sativa* – 63%, *A. fragile* – 25%, *Artemisia diffusa* – 12.5%. Доля остальных видов незначительная.

Растительность является одним из основных факторов, определяющих состояние ландшафта. Основу образуют в основном тёмно-фиолетовые цветки *M. sativa* и колоски *A. fragile*. Помимо этого небольшое участие принимают одиночные кусты *Atraphaxis spinosa* и *Salsola arbusculiformis*. Местами встречается *Artemisia diffusa*. В период исследований *Geranium transversale* был представлен 1-2 экземплярами. Оживление вносят нежно-фиолетовые цветки *Corydalis schanginii*, собранные в длинные, почти горизонтально расположенные соцветия. В незначительной доле встречаются мордовник Мейера (*Echinops meyeri*) и сорный вид – горчак ползучий (*Acroptilon repens*), а также растёт василистник изопиридный (*Thalictrum isopyroides*) с мелкими зеленоватыми цветами (рис. 2).



**Рис. 2.** Общая картина полынно-пырейно-люцерновой пастбищной разности, 09.10.2022 (фото У.Ш. Саитжановой).

Обычно при перевыпасе с пастбищ исчезают кормовые виды, а их место занимают плохо поедаемые и ядовитые. Было отмечено присутствие сорного вида *Cuscuta epilinum*, который паразитировал на люцерне, вызывая тем самым угнетение растительности и потерю зелёного пигмента. Также можно наблюдать присутствие *Acroptilon repens*.

По результатам экспедиции, урожайность люцерновых пастбищ Устюрта очень низкая – 0.8-1.3 ц/га. Максимальное значение приходится на июнь-июль в зависимости от погодных условий, причем в этот период множество видов достигает максимального нарастания. Трава люцерны посевной хорошо поедается даже в фазе начала цветения. Она является наилучшим пастбищным растением для всех сельскохозяйственных животных: кроликов и птиц, овец и крупного рогатого скота (Ларин и др., 1951). Показатель сезонной пастбищной нагрузки низкий, в среднем для овец составляет 0.06 голов скота/га. В год для выпаса 1 головы овцы требуется 5 га пастбищной территории.

Пырейно-люцерновая (*Medicago sativa*+*Agropyron fragile*) приурочена к ощебнённым маломощным, серо-бурым почвам у выходов на поверхность коренных пород. Данная пастбищная разность распространена на Восточном чинке Устюрта, вблизи родника Акбулак. Разность по днищам обрывов и саям образует густые заросли, хорошо развивается на довольно разнообразных,

даже слабо засоленных почвах, но только при условии хорошей аэрации и рыхлости. Флористический состав данной пастбищной разности составляет всего 15 видов. Процент проективного покрытия – 80%. При этом доля *M. sativa* – 63%, *A. fragile* – 37%.

Благодаря обилию злаков травяной покров приобретает луговой характер. Верхний ярус состоит из ксерофитных кустарников и полукустарников (*Atraphaxis spinosa*, *Artemisia terrae-albae*). Эти массивы являются хорошими сенокосами, однако из-за отдалённости их от населённых пунктов обычно остаются неиспользованными. Основу травостоя в данной ассоциации составляют *M. sativa* и *A. fragile*, которые при благоприятных условиях достигают мощного развития. Урожайность данной пастбищной разности – 0.1-0.4 ц/га. Максимальное значение приходится на весенний, летний и осенний сезоны. Предпочтительно стравливать люцерну в сочетании со злаками, т.к. у овец и крупного рогатого скота пастба на чистой люцерне посевной вызывает заболевание тимпанит (вздутие живота; Ларин и др., 1951). Показатель сезонной пастбищной нагрузки низкий, в среднем для овец – 0.02 головы скота/га или 14 га пастбищной территории (рис. 3).



**Рис. 3.** Общая картина пырейно-люцерновой пастбищной разности, 10.10.2022 (фото У.Ш. Саитжановой).



**Рис. 4.** Общая картина чёрнокорнево-люцерновой пастбищной разности, 10.10.2022 (фото У.Ш. Саитжановой).

Чёрнокорнево-люцерновая (*Medicago sativa*+*Cynoglossum viridiflorum*) на суглинистых почвах расположена на Восточном чинке Устюрта в окрестностях мыса Актумсук, в понижениях между террасами. Приурочена к маломощным, суглинистым почвам. Процент проективного покрытия пастбищной разности составляет 70%. При этом доля *Medicago sativa* – 64%, *Cynoglossum viridiflorum* – 28%, *Agropyron fragile* – 6%, и только 1% приходится на долю остальных видов. Основу травостоя в данной ассоциации составляют *M. sativa*, *Cynoglossum viridiflorum* и *A. fragile*. Также встречаются сорные и вредоносные виды, например, *Discurea Sophia* и *Atriplex moneta*.

Кроме этого в составе ценоза встречается ряд представителей многолетних трав (*Asparagus arvensis*, *Thalictrum isopyroides*, *Galium pamiro-alaicum*, *Scorzonera bungei*), распределенных разреженно. Несоразмерные с ростом самого растения крупные и яркие цветки *Jurinea multiloba* имеют мозаичный характер. Местами можно заметить жёлтые цветки и иную форму листьев *Scorzonera bungei*. Единичными экземплярами встречается хозяйственно-ценный многолетний эфемероид *Rheum tataricum*. В незначительной доле можно увидеть *Ephedra distachya* с ягодообразными красными шишками и эффектными зелено-сизыми побегами (рис. 4).

При созревании бобов большая доля всего урожая приходится на стебли – 50-60%. Если люцерну рано скашивают, когда побеги еще недостаточно развились и не восстановили свой запас веществ, то отрастание новых побегов задерживается и в результате можно получить низкий урожай. По нашим данным, урожайность люцерновых пастбищ на Восточном чинке составляет 0.1-0.6 ц/га. Показатель сезонной пастбищной нагрузки низкий и в среднем для овец составляет 0.02 головы скота/га или 14 га пастбищной территории, т.к. люцерновые пастбища – лучшая пастбищная культура для овец (табл.).

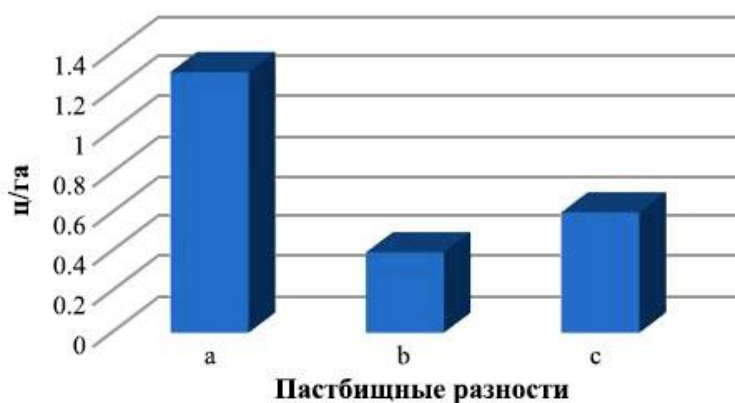
Таблица. Видовой состав люцерновых сообществ (%).

№	Виды	Сообщества		
		<i>Medicago sativa+</i> <i>Agropyron fragile-</i> <i>Artemisia diffusa</i>	<i>Medicago sativa+</i> <i>Agropyron fragile</i>	<i>Medicago sativa+</i> <i>Cynoglossum viridiflorum</i>
		Проективное покрытие		
		80%	80%	70%
<b>Кустарники</b>				
1	<i>Atraphaxis spinosa</i> L.	+*	+	+
2	<i>Salsola arbusculiformis</i> Drobow.	+	–	–
3	<i>Ephedra distachya</i> L.	–	–	+
<b>Полукустарники</b>				
4	<i>Artemisia diffusa</i> Krasch. ex Poljakov	10	–	–
5	<i>Artemisia terrae-albae</i> Krasch.	–	+	–
<b>Однолетние</b>				
6	<i>Asperugo procumbens</i> L.	–	+	–
7	<i>Discurea sophia</i> (L.) Schur	–	–	+
8	<i>Chorispora tenella</i> (Pall.) DC.	–	+	–
9	<i>Rochelia bungei</i> Trautv.	–	+	–
<b>Двулетние</b>				
10	<i>Daucus carota</i> L.	–	–	+
<b>Многолетние</b>				
11	<i>Agropyron fragile</i> (Roth) P. Candargy	20	30	4
12	<i>Asparagus</i> sp.	–	–	+
13	<i>Acroptilon repens</i> (L.) DC.	+	–	–
14	<i>Atriplex moneta</i> Bunge.	–	+	+
15	<i>Bromus inermis</i> Leyss.	–	–	+
16	<i>Jurinea multiloba</i> Iljin.	–	–	+
17	<i>Leumus multicaulis</i> (Kar. & Kir.) Tzvelev	–	–	+
18	<i>Medicago sativa</i> L.	50	50	45
19	<i>Cardaria pubescens</i> (C.A. Mey.) Jarm.	–	+	–
20	<i>Cardaria repens</i> (Schrenk) Jarm.	–	–	+
21	<i>Corydalis schanginii</i> (Pall.) B. Fedtsch.	+	–	–
22	<i>Cynoglossum viridiflorum</i> Pall. ex Lehm.	–	–	20
23	<i>Dodartia orientalis</i> L.	–	+	–
24	<i>Echinops meyeri</i> (DC.) Iljin	+	+	–
25	<i>Galium pamiro-alaicum</i> Pobed.	–	–	+
26	<i>Geranium transversale</i> (Kar. & Kir.) Vved.	+	+	–
27	<i>Rheum tataricum</i> L.	–	+	+
28	<i>Onosma staminea</i> Ledeb.	–	–	+
29	<i>Poa bulbosa</i> L.	–	+	–
30	<i>Scorzonera bungei</i> Krasch. & Lipsch.	–	–	+
31	<i>Thalictrum isopyroides</i> C.A. Mey.	+	–	+
32	<i>Tulipa sogdiana</i> Bunge.	–	+	–

Примечание к таблице: +\* – участник сообщества.

Во втором и третьем укосах содержание протеина и некоторых полезных элементов минерального питания животных в люцерне возрастает. Питательность ее зелёной массы зависит от соотношения стеблей, листьев, цветков и плодов. Чем выше вес листьев и цветков, тем выше количество протеина и других питательных веществ. Чернокорни – алкалоидные растения. Наблюдались отравления у овец при кормлении сеном с большим содержанием чернокорня. Отравления характеризовались быстрым развитием клинических признаков со стороны центральной нервной системы (вялость, сонливость) и пищеварительного тракта (рис. 5).

Степень деградации можно оценить от низкой до средней, т.к. строительство дорог малоразвито, но имеется деятельность и ведётся строительство газопроводов и имеются грунтовые дороги, которые условно используются. Также заметны незначительные оползни чинков.



**Рис. 5.** Урожайность пастбищных разностей: a – *M. sativa*+*A. fragile*–*A. diffusa*, b – *M. sativa*+*A. fragile*, c – *M. sativa*+*C. viridiflorum*.

### Выводы

Из вышесказанного следует, что люцерновые пастбища считаются универсальным кормом как для крупного, так и для мелкого рогатого скота. Почти во все сезоны формируется малая поедаемая масса. Даже в засушливых степных районах при правильном выпасе овец люцерновые или люцерново-злаковые пастбища используются 5-6 раз. Среди разностей высокое значение урожайности отмечается у полынно-пырейно-люцерновой пастбищной разности за счёт присутствия большего числа кормовых видов и нарастания поедаемой массы. В осенний период множество видов достигает максимального нарастания, причём люцерна даёт максимальный урожай в фазе полного цветения. Учитывая показатели урожайности поедаемой массы и нормы поголовья скота, можно рекомендовать люцерновый тип пастбищ как круглогодичные пастбища.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках государственной программы (ПФИ-5) «Оценка современного состояния растительного покрова и пастбищных ресурсов Республики Каракалпакстан».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобокулов Н.А., Мукимов Т.Х., Рафиев Б.Х., Расулов А. 2014. Пустынно-пастбищное животноводство Узбекистана и рациональное использование кормовых ресурсов. Ташкент: Узбекский НИИ каракулеводства и экологии пустынь. 18 с.
- Гаевская Л.С., Шамсутдинов З.Ш., Штефан М.К. 1958. Растения каракулеводческих пастбищ Средней Азии. Самарканд. С. 5-6.
- Зарипов Х., Турсунбаев К., Алланиязов А. 1972. Растительность пастбищ Юго-Восточного Устюрта. Ташкент: Фан. 171 с.
- Клейменова И.Е. 2010. Эколого-географическое районирование Каракалпакского Устюрта // Вестник ОГУ. № 10 (116). С. 106-111.
- Ларин И.В., Агабабян Ш.М., Работнов Т.А., Ларина В.К., Смелов С.П., Касименко М.А., Говорухин В.С., Работнов Т.А., Зафрен С.Я. 1951. Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР. Т. 2: Двудольные (хлорантовые-бобовые). М.-Л.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. 947 с.

- Методические указания по геоботаническому обследованию естественных кормовых угодий Узбекистана. 1980. Ташкент: Институт Узгипрозем. 170 с.
- Нечаева Н.Т., Приходько С.Я. 1966. Искусственные зимние пастбища в предгорных пустынях Средней Азии. Ашхабад: АН ТуркмССР. С. 106-107.
- Николаев В.Н., Амангельдиев А.А., Сметанкина В.А. 1977. Пустынные пастбища, их кормовая оценка и бонитировка. М.: Наука. 123 с.
- Общесоюзной инструкции по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий и составлению крупномасштабных геоботанических карт. 1984. М.: Колос. 105 с.
- Полевая геоботаника. 1964 / Ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагин. М.: Наука. Т. 3. 230 с.
- Раменский Л.Г. 1971. Избранные работы. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л.: Наука. 335 с.
- Сарыбаев Б. 1981. Флора и растительность Восточного чинка Устюрта. Ташкент: Фан. 90 с.
- Тарковский М.И., Константинова А.М., Шаин С.С. 1964. Люцерна. М.: Колос. 391 с.
- Хасанов О.Х., Рахимова Т., Шомуродов Х.Ф. 2000. О классификации пастбищ // Экологический вестник. № 1. С. 43-44.
- Шамсутдинов Н.З., Шамсутдинова Э.З. 2015. Естественные кормовые ресурсы аридных областей Средней Азии: перспективы использования их в фитомелиорации и селекции (в связи с 65-летием выхода в свет трехтомной монографии «Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР») [Электронный ресурс <http://www.cawater-info.net/bk/improvement-irrigated-agriculture/irrigated-agriculture.htm> (дата обращения 05.07.2024)].
- Шомуродов Х.Ф. 2018. Кормовые растения Кызылкума и перспективы их использования. Автореф. дисс. док. биол. наук. Ташкент. 62 с.
- Adilov B., Shomurodov H., Lianlian F.A.N., Kaihui L.I., Xuexi M.A., Yaoming L.I. 2021. Transformation of Vegetative Cover on the Ustyurt Plateau of Central Asia as a Consequence of the Aral Sea Shrinkage // Journal of Arid Land. Vol. 13. No. 1. P. 71-87.
- ESRI ArcGIS ArcView v.10.6. 2024 [Электронный ресурс <http://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro> (дата обращения 05.07.24)].
- Plants of the World Online. 2022 [Электронный ресурс <http://www.plantsoftheworldonline.org/> (дата обращения 05.07.24)].
- Rakhimova N.K., Rakhimova T. 2022. The Status of *Salsola arbusculiformis* and *Anabasis salsa* Shrub Grasslands on the Ustyurt Plateau in Karakalpakstan (Uzbekistan) // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 3. P. 286-295. [Рахимова Н.К., Рахимова Т. 2022. Современное состояние чернобояльшево-биюргуновых пастбищ Каракалпакского Устюрта (Узбекистан) // Аридные экосистемы. Т. 28. № 3 (92). С. 61-71.]
- Rakhimova N.K., Rakhimova T., Shomurodov Kh.F., Adilov B.A., Sharipova V.K., Saitjanova U.Sh., Khabibullaev B.Sh., Sadinov J.S., Polvonov F.I., Sultamuratov A.T. 2023. Assessment of the current state of rangelands in Karakalpak Ustyurt, Uzbekistan // Biodiversitas. Vol. 24. No. 7. P. 3835-3843.
- Sharipova V.K., Rakhimova T., Rakhimova N.K. 2022. Ecological State of Some Pasture Differences of *Haloxylon ammodendron* of Karakalpak Ustyurt (Uzbekistan) // E3S Web Conference 361. P. 04028.
- Shomurodov Kh.F., Rakhimova N.K., Saitjanova U.Sh., Zhenyong Zh.. 2023. The Ecological-Phytocenotic Characteristics of *Halocnemum strobilaceum* (Pall.) Bieb. Grasslands on the Ustyurt Plateau in Karakalpakstan // Arid Ecosystems. Vol. 13. No. 4. P. 507-517. [Шомуродов Х.Ф., Рахимова Н.К., Саитжанова У.Ш. 2023. Эколого-фитоценотическая характеристика сарсазановых (*Halocnemum strobilaceum* (Pall.) bieb.) пастбищ Каракалпакского Устюрта // Аридные экосистемы. Т. 29. № 4 (97). С. 153-164.]

УДК 502.054.2; 502.057; 502.472; 504.7

**ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ФАУНЫ И НАСЕЛЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ПОЗВОНОЧНЫХ ГОРНЫХ ПУСТОШЕЙ С ПОМОЩЬЮ ФОТОЛОВУШЕК НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ХРЕБТА ТУКУРИНГА**

© 2024 г. С.А. Подольский\* \*\*, Д.С. Чемирская\*\*, В. Савочка\*\*

\*Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: sergpod@mail.ru

\*\*Зейский государственный заповедник

Россия, 676246, г. Зeya, ул. Строительная, д. 71. E-mail: zzap@mail.ru

Поступила в редакцию 01.05.2024. После доработки 01.06.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Описано применение фотоловушек для изучения фауны и населения наземных позвоночных горных пустошей Зейского государственного природного заповедника, занимающего восточную часть хребта Тукуринга. Использована оригинальная методика учета млекопитающих с помощью фотоловушек, где в качестве итогового показателя рассматривается нагрузка на площадь зоны фото-видеорегистрации за единицу времени, выраженная в количестве особей на единицу площади (Подольский и др., 2020). Экстремальные условия обитания (недостаток влаги в вегетационный период, частые штормовые ветра и пр.), наряду с сезонными миграциями и периодическими кормовыми концентрациями, определяют особенности животного населения горных пустошей и трудности его изучения; применения стандартных методов наблюдений недостаточно. Устанавливалось 9 камер: 8 – в горных тундрах с куртинами кедрового стланика, 1 – в подгольцовом аянском ельнике, на пресечении звериных троп. Для млекопитающих показатели плотности населения, рассчитанные по данным фотоловушек, сравнивались с результатами учетов многодневным окладом и другими стандартными методами; по результатам оценивалась возможность использования метода для учета различных видов. Показано, что в условиях горных пустошей он оптимален для фиксации основных параметров (плотность населения, сроки) летне-осенних кормовых концентраций бурых медведей (*Ursus arctos*), а также применим для учета еще нескольких видов зверей: зайца-беляка (*Lepus timidus*), рыси, вероятно, – россомахи. Предлагаемый метод учета на гольцах неприменим к соболю (*Martes zibellina*), белке (*Sciurus vulgaris*) и азиатскому бурундуку (*Eutamias sibiricus*). Плотность населения упомянутых видов, рассчитанная по данным фотоловушек, оказалась на несколько порядков ниже, чем при учетах стандартными методами. Описанная методика также непригодна для определения численности птиц. В то же время анализ съемок установленных камер позволил расширить перечень видов птиц, регулярно посещающих горные пустоши, а также дополнить список орнитофауны Зейского заповедника: впервые отмечены средний кроншнеп (*Numenius phaeopus*) и сибирский горный вьюрок (*Leucosticte arctoa*). Природные особенности верхних высотных поясов хребта Тукуринга, специфика организации исследований в экстремальных условиях, технические возможности современных автоматических камер и разработанная методика учета определяют значительные перспективы использования фотоловушек для изучения фауны и населения зверей и птиц горных пустошей Зейского заповедника.

**Ключевые слова:** горные пустоши, фотоловушки, методика учета, млекопитающие, бурый медведь, сезонные концентрации, плотность населения, птицы, видовой состав, сезонные миграции.

**DOI:** 10.24412/1993-3916-2024-4-96-106

**EDN:** LKQVWL

Хребет Тукуринга находится на территории Зейского района Амурской области. Он входит в горную цепь Тукуринга – Соктахан – Джагды субширотного простирания. Севернее расположена

Верхнезейская низменность, отделяющая хр. Турукингра от Станового хребта; южнее – Амурско-Зейское плато. Район исследований включает наиболее возвышенный центральный участок Зейского заповедника, занимающего восточную часть Тукурингра с максимальной высотой хребта 1442 м н.у.м. БС.

Растительность представляет горнотундрово-бореальный комплекс и относится к южной подзоне хвойных лесов (Колесников, 1965). Хорошо выражена высотная поясность: светлохвойные леса с преобладанием лиственницы даурской расположены на высотах 500-900 м; зеленомошные темнохвойные леса из ели аянской – на высотах 900-1100 м; подгольцовый пояс (1100-1300 м) представлен кедровостланничниками и каменноберезняками с участием лиственницы. Максимальные высоты 1100-1442 м занимают горные пустоши с каменистыми, кустарничковыми и мохово-лишайниковыми тундрами, местами – с куртинами кедрового стланика. Они расположены на гребнях хребтов и узких плакорах шириной около 200-400 м. Этот тип местообитаний и урочище в Зейском заповеднике принято называть «Гольцы», хотя обычно гольцы в Северном Приамурье начинаются с высот 1800-1900 м и полностью лишены древесной растительности, в т.ч. кедрового стланика. Результаты исследований, приведенные в этой работе, относятся преимущественно к горным пустошам – «гольцам», занимающим 3233 га (32.3 км<sup>2</sup>) в центральной части Зейского заповедника.

Для большей части урочища «Гольцы» характерна умеренная аридизация, с которой связано и понижение верхней границы леса на 300-500 м относительно региональной нормы. В вегетационный период растительность здесь испытывает определенный дефицит влаги. Это связано с несколькими факторами. Снижение температуры с высотой (примерно 0.5° на 100 м) служит главной причиной высотной поясности. Поскольку величина абсолютной влажности уменьшается с понижением температуры, с увеличением высоты в горах снижается и влажность воздуха (Гвоздецкий, Голубчиков, 1987). На главном водоразделе Тукурингра выпадает не меньше осадков, чем на остальной территории заповедника, – до 600 мм (Васильев и др., 1985). Однако из-за особенностей рельефа влага там практически не задерживается, быстро скатываясь вниз с поверхностным стоком. В горных районах при нисходящих движениях воздуха, захватывающих слой атмосферы не менее 0.5 км, часто развиваются фены – сухие порывистые ветры (Гвоздецкий, Голубчиков, 1987). Ветровой режим, наряду с дефицитом влаги, относится к основным причинам отсутствия лесной растительности на «гольцах» Зейского заповедника.

Для населения наземных позвоночных «гольцов» Зейского заповедника характерны повышенная нестабильность, как по сезонам, так и по годам. Важным фактором, влияющим на зоокомплексы рассматриваемой территории, является наличие зарослей кедрового стланика, приносящих обильный урожай орешков раз в 4-5 лет. Этот дефицитный ресурс практически отсутствует на равнинах, как южнее хребта Тукурингра, так и на 200-300 км севернее это хребта (вплоть до среднегорий Станового хребта). В урожайные годы, во время созревания орешков кедрового стланика, во второй половине лета – начале осени (вторая половина июля – август – начало сентября) здесь отмечаются концентрации многих видов зверей: бурого медведя (*Ursus arctos*<sup>1</sup>), соболя (*Martes zibellina*), зайца-беляка (*Lepus timidus*), бурундука (*Eutamias sibiricus*), белки (*Sciurus vulgaris*), мышевидных грызунов; а также птиц: кедровки (*Nucifraga caryocatactes*), поползня (*Sitta europaea*), щура (*Pinicola enucleator*), большой горлицы (*Streptopelia orientalis*), канюка (*Buteo japonicus*), перепелятника (*Accipiter nisus*), пустельги (*Falco tinnunculus*). Точные сроки таких концентраций нельзя предугадать, они могут смещаться на 2-3 недели в любую сторону. Кроме того, «гольцы» используются как место отдыха во время сезонных пролетов многими видами птиц, предпочитающими открытые или полуоткрытые биотопы; среди них полевые – полевой жаворонок (*Alauda arvensis*), полевой лунь (*Circus cyaneus*); тундрово-степные – рогатый жаворонок (*Eremophila alpestris*); тундровые – белая сова (*Nyctea scandiaca*); околотоводно-болотные – болотная сова (*Asio flammeus*), средний кроншнеп (*Numenius phaeopus*). Во второй половине осени большинство зверей и птиц покидают гольцы. На зиму здесь остается незначительное число видов, максимально адаптированных к крайне суровому климату горных пустошей: белая куропатка (*Lagopus lagopus*), красная полевка

<sup>1</sup> Латинские названия видов зверей приведены по монографии «Млекопитающие России: список видов и прикладные аспекты» (Лисовский и др., 2019). Латинские названия видов птиц приведены по В.К. Рябицеву (2002) и Р.Л. Беме с соавторами (1988).

(*Myodes rutilus*), северная пищуха (*Ochotona hyperborea*), заяц-беляк (*Lepus timidus*), горноста́й (*Mustela erminea*); другие позвоночные в это время года могут появляться лишь эпизодически.

Экстремальные условия обитания (недостаток влаги в вегетационный период, частые штормовые ветра во все сезоны, преобладание открытых биотопов со слабыми защитными свойствами, резкий контраст высоты снежного покрова от 0 до 170 см, наличие плотного ветрового наста), наряду с сезонными миграциями и периодическими кормовыми концентрациями, определяют особенности животного населения «гольцов» и трудности его изучения. Применения обычных стандартных методов наблюдений, таких как зимний маршрутный учет или ЗМУ (Кузякин и др., 1990), многодневный оклад (Русанов, 1986), маршрутный учет по встречам на трансектах, оказывается недостаточно для определения показателей численности млекопитающих, выявления сезонных особенностей населения и фаунистического состава наземных позвоночных.

Для получения недостающей информации были использованы фиксация видов зверей и птиц, а также учет численности крупных и средних млекопитающих с помощью фотоловушек. Важным преимуществом такого подхода является возможность проведения длительных непрерывных наблюдений, захватывающих один или несколько сезонов. Это позволяет объективно характеризовать сезонную динамику животного населения, отражая кормовые и миграционные концентрации наземных позвоночных. Кроме того, при длительном использовании фотоловушки могут фиксировать редкие виды, ранее не отмечавшиеся в обследуемых биотопах, урочищах и даже регионах. Так, в национальном парке «Земля леопарада» при анализе массива снимков, сделанных фотоловушками, был отмечен водяной олень – новый вид копытных для фауны России (Дарман и др., 2019).

#### Материалы и методы

В последние годы исследование экологии наземных животных с помощью фотоловушек стало важной составляющей полевых зоологических наблюдений. Изначально фотоловушки использовались преимущественно для регистрации и учета редких видов крупных млекопитающих. При этом подход к анализу данных основывался на возможности персональной идентификации учитываемых объектов с использованием методов повторной регистрации (Коли, 1979; Karanth, 1995). Позже начали разрабатываться методы использования фотоловушек для оценки обилия фоновых видов зверей, персональная идентификация которых невозможна или затруднительна. Существует два основных направления: 1) определение относительных показателей обилия; 2) определение плотности населения.

В первом случае обычно используется показатель «количества регистраций» каждого вида (Желтухин, Огурцов, 2018). Несмотря на преимущество простоты обработки данных, он имеет существенные ограничения. Основной проблемой является неопределенность в вопросе: что именно считать за одну регистрацию? Даже при его однозначном решении полученные данные представляют показатели обилия, несопоставимые с результатами стандартных методов учета охотничьих животных (Кузякин и др., 1990; Русанов, 1986; Сорокина, 1977).

Для расчета плотности населения животных по данным с фотоловушек обычно используется формула Роклифа (Rowcliffe et al., 2008):

$$D = (y / t) \cdot (\pi / v r \cdot (2 + \theta)),$$

где  $D$  – плотность населения;  $y/t$  – количество фотофиксаций за единицу времени;  $v$  – скорость (средняя) передвижения животного;  $r$  – дальность детекции (обнаружения);  $\theta$  – угол детекции (в радианах). Она почти идентична формуле Формозов-Мальшева-Перелишина (Формозов, 1990; Перелишин, 1956) для ЗМУ по суточным следам  $D = (y / t) \cdot (\pi / v r \cdot 2)$  и отличается от нее только показателем  $\theta$ . Если он равен нулю, то разница между формулами нивелируется. При учете фотоловушками по Дж.М. Роклифу (Rowcliffe et al., 2008) возникает проблема, сходная с решаемой при ЗМУ: для определения плотности населения необходимо иметь пересчетный коэффициент, отражающий информацию о подвижности вида, – длину суточного хода (при ЗМУ) или скорость передвижения (при учете фотоловушками). Для каждого вида зверей эти показатели зависят от многих факторов: высоты снежного покрова, температуры воздуха, кормности и защитных свойств угодий, пола, возраста и др. Большинство из них существенно меняется по сезонам и годам. Пересчетные коэффициенты к формуле Формозова для ЗМУ получают с помощью троплений или

учетов на площадках. Для учета фотоловушками по методике Дж.Р. Роклифа показатели подвижности могут определяться при помощи радиомечения. На практике из-за трудоёмкости получения параметров подвижности учитываемых видов часто используется условная средняя величина скорости передвижения без учета сезонных особенностей и условий конкретного года, что существенно снижает репрезентативность полученных результатов.

Существует иной подход к определению плотности населения с помощью фотоловушек, при котором в качестве итогового количественного показателя рассматривается нагрузка определенного вида на площадь зоны фото-видеорегистрации (далее – регистрации) за единицу времени (месяц, декада, общее время экспозиции и т.п.), выраженную в количестве особей на единицу площади, например, особей на 1000 га (Подольский и др., 2019, 2020; Кастрикин и др., 2020; Волков, Суров, 2022; Nakashima et al., 2018, 2020). На такой основе нами разработан и апробирован метод, позволяющий с помощью фотоловушек и без дополнительных пересчетных коэффициентов получать количественные оценки численности средних и крупных наземных зверей, сравнимые с результатами общепринятых методов учета плотности населения млекопитающих (Подольский и др., 2019, 2020; Кастрикин и др., 2020).

Для получения искомого показателя нагрузки на зону регистрации ( $D$ ), выраженного в количестве особей на 1000 га (ос./1000 га), необходимо определить три основных параметра: 1) площадь зоны регистрации, 2) продолжительность пребывания животных определенного вида в зоне регистрации, 3) продолжительность работы (экспозиции) фотоловушки. Таким образом, получается:

$$D = 10000000 \cdot k \cdot Tr/TtSr,$$

где  $D$  – плотность населения в особях на 1000 га;  $Tr$  – суммарное время нахождения животных учитываемого вида зверей в зоне регистрации фотоловушки в секундах;  $Tt$  – время работы (экспозиции) фотоловушки в секундах;  $Sr$  – площадь зоны регистрации фотоловушки в квадратных метрах,  $k = 1$  ос. – коэффициент, обеспечивающий совпадение размерностей в левой и правой частях формулы,  $10000000 \text{ м}^2 = 1000$  га. Если в зоне регистрации одновременно находится несколько особей одного вида, то время пребывания всех особей суммируется. На основе полученных с помощью фотоловушек исходных данных рассчитываются показатели обилия различных видов наземных млекопитающих для каждого месяца за период экспозиции камеры. Для оценки репрезентативности полученных показателей плотности населения по разным видам мы сравнили их с результатами стандартных методов учета зверей (ЗМУ, многодневный оклад, учет по встречам на трансектах и др.), полученными на той же территории или на сопредельных участках.

Было установлено всего 9 фотоловушек Browning Recon Force Advantage: 8 камер (№№ 1-8) в открытых и полуоткрытых биотопах горных пустошей урочища «Гольцы», представляющих чередование травянистых, лишайниковых и каменистых горных тундр с куртинами кедрового стланика; 1 камера (№ 9) – у хорошо набитой звериной тропы в сомкнутом подгольцовом аянском ельнике на водоразделе рек Каменушка и Малая Эракингра. Расстояние между камерами – не менее 500 м; на пустошах (гольцах) расстояние между крайними камерами №№ 1 и 8 – около 10.5 км. Площадь зоны регистрации каждой фотоловушки определялась опытным путем в процессе установки. Камеры на гольцах устанавливались 30.07.2023-01.08.2023; демонтировались 29.10.2023. Камера в аянском ельнике устанавливалась 29.07.2023 и временно демонтировалась 29.10.2023. Длительность работы разных камер на гольцах различалась, но в целом наблюдениями был охвачен период с конца июля по октябрь, включающий как кормовую концентрацию животных на орешках кедрового стланика, так и осеннюю миграцию птиц. Камера на тропе в аянском ельнике работала непрерывно. Сведения о местах установки камер и первичные данные их работы приведены в таблицах 1 и 2.

Для крупных млекопитающих показатели плотности населения, рассчитанные по данным фотоловушек, сравнивались с результатами учетов стандартными методами: ЗМУ (Кузякин и др., 1990), многодневного оклада (Русанов, 1986), идентификации медведей по следам на грунте (Пучковский, Сунцова, 1991), а также данными учета медведей по встречам на маршрутах в горных тундрах (Подольский, Красикова, 2003), полученными на сопредельной территории. Ближайшим местом, где в 2018-2024 гг. проводились учеты многодневным окладом, является площадка «Каменушка», расположенная в 2-12 км юго-западнее мест установки фотоловушек на гольцах

(табл. 3); в разные годы ее площадь составляла от 750 до 777.2 га. Кроме того, использованы данные учетов фотоловушками в аянском ельнике на водоразделе р. Каменушка и Малая Эракингра в предыдущие годы (Подольский и др., 2020).

**Таблица 1.** Результаты учета численности наземных позвоночных на горных пустошах урочища «Гольцы» с помощью фотоловушек в 30.07.2023-29.10.2023.

Виды	Обилие	Параметры работы фотоловушек			
		Июль №№ камер: 1-7* Tt = 684762 сек, Sr = 636 м <sup>2</sup>	Август №№ камер: 1-8 Tt = 140022060 сек, Sr = 658 м <sup>2</sup>	Сентябрь №№ камер: 2, 3, 7, 8 Tt = 10368000 сек, Sr = 282м <sup>2</sup>	Октябрь №№ камер: 2, 3, 7, 8 Tt = 7769340 сек, Sr = 282 м <sup>2</sup>
Медведь ( <i>Ursus arctos</i> )	Tr (сек)	0	2661	12	0
	D (ос./1000 га)	0	2.88	0.04	0
Соболь ( <i>Martes zibellina</i> )	Tr (сек)	0	24	17	7
	D (ос./1000 га)	0	0.03	0.06	0.03
Рысь ( <i>Lynx lynx</i> )	Tr (сек)	0	0	0	3
	D (ос./1000 га)	0	0	0	0.013
Заяц ( <i>Lepus timidus</i> )	Tr (сек)	12	1016	433	46
	D (ос./1000 га)	0.28	1.1	1.48	0.21
Белка ( <i>Sciurus vulgaris</i> )	Tr (сек)	0	3	0	0
	D (ос./1000 га)	0	0.004	0	0
Бурундук ( <i>Eutamias sibiricus</i> )	Tr (сек)	0	23	0	0
	D (ос./1000 га)	0	0.03	0	0
Кабарга ( <i>Moschus moschiferus</i> )	Tr (сек)	0	0	0	0
	D (ос./1000 га)	0	0	0	0
Дикуша ( <i>Falci pennis falci pennis</i> )	Tr (сек)	0	300	0	0
	D (ос./1000 га)	0	0.33	0	0
Белая куропатка ( <i>Lagopus lagopus</i> )	Tr (сек)	0	5	0	0
	D (ос./1000 га)	0	0.006	0	0

**Примечания к таблице 1:** \* – координаты мест установки камер: № 1 – 54° 09' 22.0" с.ш., 126° 47' 46.4" в.д.; № 2 – 54° 09' 12.6" с.ш., 126° 48' 07.8" в.д.; № 3 – 54° 09' 07.9" с.ш., 126° 48' 27.0" в.д.; № 4 – 54° 09' 09.0" с.ш., 126° 48' 49.5" в.д.; № 5 – 54° 09' 14.2" с.ш., 126° 48' 00.8" в.д.; № 6 – 54° 08' 39.2" с.ш., 126° 51' 03.9" в.д.; № 7 – 54° 08' 38.5" с.ш., 126° 51' 09.6" в.д.; № 8 – 54° 08' 42.7" с.ш., 126° 51' 26.3" в.д.

### Результаты и обсуждение

*Млекопитающие.* Сравнивая результаты учета с помощью фотоловушек горных пустошей (табл. 1, 2) с данными, полученными иными методами, постараемся определить, насколько пригоден рассматриваемый метод для учета различных видов зверей и каковы особенности его использования.

**Бурый медведь** (*Ursus arctos* Linnaeus, 1758) в Зейском заповеднике и на прилегающей территории имеет важную особенность экологии, а именно, сезонные концентрации на горных пустошах (гольцах) с куртинами кедрового стланика. В годы максимального урожая кедровых

орешков, отмечаемые раз в 4-6 лет, на площади около 3.2 тыс. га собираются медведи с территории, в 2-3 раза превышающей весь заповедник размером около 100 тыс. га. Так, во время визуального учета по встречам в августе 2000 г. при самом большом урожае кедрового стланика (5 баллов) была зафиксирована максимальная плотность населения медведей на гольцах – 11.1 ос./1000 га (Подольский, Красикова, 2003), что почти на два порядка выше аналогичного показателя для лесных биотопов заповедника – 0.14-0.18 ос./1000 га, ежегодно регистрируемого с помощью идентификации следов на грунте (Пучковский, Сунцова, 1991). Концентрации медведей на гольцах отмечаются и в неурожайные годы (2-2.5 балла), но плотность населения значительно ниже; например, в конце лета 2002 г. показатель составил 1.4 ос./1000 га. Необходимо отметить, что в урожайные годы значительно выше не только плотность населения, но и продолжительность концентраций медведей на гольцах и в подгольцовой зоне – с середины июня почти до середины сентября (Подольский и др., 2020). В обычные годы массовое посещение медведями горных пустошей со стлаником ограничивается августом.

**Таблица 2.** Результаты учета численности наземных позвоночных в подгольцовом аянском ельнике у звериной тропы с помощью фотоловушки в 29.07.2023-29.10.2023.

Виды	Обилие	Параметры работы фотоловушек			
		Июль № камеры: 9* Tt = 206340 сек, Sr = 34 м <sup>2</sup>	Август № камеры: 9 Tt = 2678400 сек, Sr = 34 м <sup>2</sup>	Сентябрь № камеры: 9 Tt = 2592000 сек, Sr = 34 м <sup>2</sup>	Октябрь № камеры: 9 Tt = 2542080 сек, Sr = 34 м <sup>2</sup>
Медведь ( <i>Ursus arctos</i> )	Tr (сек)	0	117	23	23
	D (ос./1000 га)	0	12.84	2.61	2.66
Соболь ( <i>Martes zibellina</i> )	Tr (сек)	0	3	40	0
	D (ос./1000 га)	0	0.33	4.54	0
Рысь ( <i>Lynx lynx</i> )	Tr (сек)	0	0	0	20
	D (ос./1000 га)	0	0	0	2.31
Заяц ( <i>Lepus timidus</i> )	Tr (сек)	0	30	137	110
	D (ос./1000 га)	0	3.3	15.55	12.73
Белка ( <i>Sciurus vulgaris</i> )	Tr (сек)	0	55	10	0
	D (ос./1000 га)	0	6.04	1.13	0
Бурундук ( <i>Eutamias sibiricus</i> )	Tr (сек)	0	0	0	0
	D (ос./1000 га)	0	0	0	0
Кабарга ( <i>Moschus moschiferus</i> )	Tr (сек)	0	23	0	0
	D (ос./1000 га)	0	2.53	0	0
Дикуша ( <i>Falci pennis falci pennis</i> )	Tr (сек)	0	0	10	0
	D (ос./1000 га)	0	0	1.3	0

**Примечание к таблице 2:** \* – координаты места установки камеры № 9 – 54° 09' 00.4" с.ш., 126° 47' 14.3" в.д.

Урожай орешков кедрового стланика в 2024 г. был несколько выше среднего, но далек от максимального (3.5 балла). Концентрация медведей на гольцах отмечена только в августе; плотность

населения, определенная при помощи фотоловушек, составила около 2.9 ос./1000 га (табл. 1). Тот же показатель, установленный по данным визуальных наблюдений зверей на горных пустошах, был выше примерно на 20% – 3.64 ос./1000 га (на 22 км маршрутов было встречено 2 одиночных медведя на расстоянии 400 и 100 м). Некоторое расхождение результатов может объясняться тем, что ни одной фотоловушкой не зафиксированы звери на отдыхе. В таком случае недоучет может составлять до 20-30% (Кастрикин и др., 2020; Волков, Суков, 2022).

**Таблица 3.** Результаты учетов млекопитающих многодневным окладом на площадке «Каменушка» в 2018-2024 гг.

Виды	Плотность населения по годам (особей/1000 га)						В среднем (особей/1000 га)
	2018 г. (27.02-02.03)	2019 г. (18.02-21.02)	2021 г. (19.02-22.02)	2022 г. (07.02-10.02)	2023 г. (01.03-04.03)	2024 г. (12.02-14.02)	
Соболь ( <i>Martes zibellina</i> )	16.3	12.4	8.75	10.8	11.3	6.7	11.1
Ласка ( <i>Martes zibellina</i> )	5.1	0	0.3	0.8	1.33	0	1.3
Горноста́й ( <i>Mustela ermine</i> )	3.9	2.4	0	0	0	0	1.1
Росомаха ( <i>Gulo gulo</i> )	0	0	0	0.25	0.17	0.3	0.12
Рысь ( <i>Lynx lynx</i> )	0	0	0	0	0.17	0	0.03
Белка ( <i>Sciurus vulgaris</i> )	4.76	14.4	1.3	5.5	3.0	0.7	4.9
Летяга ( <i>Pteromys volans</i> )	1.3	5.1	0	1.3	0.67	2.7	1,8
Заяц-беляк ( <i>Lepus timidus</i> )	2.2	3.73	0	0	0	0	0.99
Кабарга ( <i>Moschus moschiferus</i> )	0.43	0.4	0.3	0	0	0	0.19
Сибирская косуля ( <i>Capreolis pygargus</i> )	0	2.4	6.4	4.0	0	0	2.1
Изюбрь ( <i>Cervus elaphus</i> )	0	0.67	2.6	1.0	1.0	0.7	1.0
Лось ( <i>Alces alces</i> )	0	1.33	0	1.0	0	0	0.39

Перемещаясь к местам кормежки и откочевывая обратно к участкам постоянного обитания, медведи проходят по набитым тропам через подгольцовые аянские ельники. В таком месте – на пресечении миграционных троп – с 2018 года установлена фотоловушка № 9. В августе 2024 г. она показала плотность населения медведя, равную 12.84 ос./1000 га. Это в 4.4 раза выше, чем в то же время на гольцах – 2.9 ос./1000 га. Данное соотношение, полученное эмпирическим путем, можно использовать для примерной оценки плотности населения медведей на гольцах в предыдущие годы при различном урожае орешков кедрового стланика. Например, 2018 г. по урожайности был существенно выше среднего (4.5 балла), но не достигал максимума. Тогда наибольшая плотность населения медведей, отмеченная во второй декаде августа, достигала 42.8 ос./1000 га, что при делении на 4.4 соответствует показателю 9.7 ос./1000 га на гольцах. Этот результат вполне сопоставим с максимальной концентрацией медведей, отмеченной в 2000 г. и составившей 11.1 ос./1000 га (Подольский, Красикова, 2003).

В целом можно констатировать, что применение фотоловушек для учета медведей на горных пустошах и в других биотопах вполне оправдано, т.к. оно дает результаты, сходные с другими методами. Кроме того, для Зейского заповедника важно найденное соотношение между плотностью населения медведя фиксируемой постоянно работающей фотоловушкой № 9 на пересечении троп в аянском ельнике и плотностью населения этого вида во время концентраций на гольцах – 4.4. Данное соотношение позволит примерно оценивать показатели численности медведей в период плодоношения стланика даже без полномасштабных специальных учетов.

**Соболь** (*Martes zibellina* Linnaeus, 1758) является самым многочисленным видом хищников Зейского заповедника. Он наиболее характерен для лесных местообитаний. Максимальная плотность населения соболя на площадке многодневного оклада «Каменушка» – 16.4 ос./1000 га в 2018 г., минимальная – 6.7 ос./1000 га, средняя многолетняя – 11.1 ос./1000 га (табл. 3). Обычно горные

пустоши не относятся к излюбленным биотопам соболя, но в период созревания орешков кедрового стланика он значительно чаще посещает гольцы, чем в другие сезоны. Можно сказать, что у соболя здесь также отмечаются сезонные концентрации, хотя и не столь выраженные, как у медведя. Учет по встречам на маршрутах показал, что в начале августа 2023 г. плотность населения соболя на гольцах составляла не менее 20.2 ос./1000 га (на 22 км маршрутов было встречено 2 соболя на расстоянии 10 и 80 м). Расчет этого показателя по данным фотоловушек за август-сентябрь показал несопоставимо меньший результат – 0.03-0.06 ос./1000 га (табл. 1). Вероятно, скорость передвижения этого активного зверька часто бывает столь велика, что на него не всегда успевают реагировать даже самые чувствительные фотоловушки. К тому же, находясь в верхних высотных поясах, соболь большую часть времени проводит не на открытых местах, а в зарослях стланика, где не фиксируется камерами. Полученные результаты говорят о том, что корректное определение плотности населения соболя на гольцах по данным фотоловушек невозможно, т.к. по сравнению со стандартными методами оно дает недоучет на несколько порядков.

**Рысь** (*Lynx lynx* Linnaeus, 1758) на территории Зейского заповедника в основном охотится на зайца-беляка. В периоды депрессий зайца некоторые особи начинают более активно охотиться на кабаргу и косулю (Матюшкин и др., 2003). В последние годы затяжные депрессии зайца и кабарги совпали со снижением численности косули. Рысь определенно стала самым редким видом крупных хищников заповедника; среднюю плотность ее населения в 2020-х гг. можно примерно оценить в 0.009-0.01 ос./1000 га. Подгольцовые аянские ельники бассейна р. Каменушка являются одним из немногих мест, где заяц-беляк сохраняется даже во время глубоких депрессий, поэтому рысь встречается здесь чаще, чем на остальной территории заповедника (табл. 2, 3): средний многолетний показатель плотности населения на площадке «Каменушка» – 0.03 ос./1000 га. Рысь считается типичным лесным видом, избегающим открытых биотопов. Однако учет с помощью фотоловушек в октябре 2023 г. показал, что плотность ее населения на горных пустошах составила не менее 0.013 ос./1000 га (табл. 1), что примерно соответствует среднему показателю для заповедника (примечательно, что животное было зарегистрировано в светлое время суток). Это говорит о том, что фотоловушки могут успешно использоваться для учета рыси. Кроме того, фоторегистрация достоверно показала, что этот вид посещает горные пустоши наряду с другими биотопами.

**Заяц-беляк** (*Lepus timidus* Linnaeus, 1758) на территории Зейского заповедника в течение последних 8-9 лет находится в глубокой депрессии. Одно из немногих мест, где он остается обычным, – это верхний лесной пояс бассейна р. «Каменушка», а в первую очередь – подгольцовые аянские ельники (табл. 2). В сентябре 2023 г. фотоловушки на гольцах зафиксировали плотность населения беляка – 1.48 ос./1000 га, что примерно соответствует среднему многолетнему показателю для площадки «Каменушка» – 0.99 ос./1000 га (табл. 3), но значительно ниже, чем на тропях в подгольцовом ельнике (табл. 2). По-видимому, это отражает реальную картину высотного распределения вида: зайцев на горных пустошах несколько больше, чем в нижних лесных поясах, но существенно меньше, чем в подгольцовых аянских ельниках. Для данного вида использование фотоловушек – оптимальный метод учета на гольцах, поскольку из-за преобладающей ночной активности и повышенной осторожности учет зайцев по встречам на маршрутах практически невозможен. Зимний учет по следам также неэффективен: из-за минимальной нагрузки на грунт и плотного ветрового наста зайцы практически не проваливаются в снег, а тонкие следы их когтей быстро заметаются ветром.

**Обыкновенная белка** (*Sciurus vulgaris* Linnaeus, 1758) – типичный обитатель хвойных лесов Зейского заповедника, в первую очередь ельников – как долинных, так и подгольцовых. Ее численность подвержена значительным колебаниям в зависимости от урожая семян ели. На площадке «Каменушка» регистрировалась плотность населения белки от 0.7 ос./100 га в 2024 г. до 14.4 ос./1000 га в 2018 г., в среднем – 4.9 ос./1000 га. Наблюдения с помощью фотоловушек показали, что в период плодоношения кедрового стланика белки могут посещать гольцы, но показатель плотности ее населения, зарегистрированный этим методом, составил 0.004 ос./1000 га (табл. 1) и оказался на несколько порядков ниже, чем при зимних учетах (табл. 3). Вероятно, для белок, проводящих значительную часть времени среди ветвей кедрового стланика, корректное определение плотности населения на гольцах по данным фотоловушек невозможно.

**Азиатский бурундук** (*Eutamias sibiricus* Laxmann, 1769) встречается во всех биотопах Зейского заповедника. Летом и осенью весьма характерен для горных пустошей с зарослями кедрового стланика, где активно запасает орешки на зиму. Судя по встречам на маршрутах, плотность населения бурундуков на гольцах в начале августа составляла не менее 130.4 ос./1000 га (на 22 км встречено 6 бурундуков на следующих дистанциях: 1 особь – 5 м, 1 – 10 м, 2 – 15 м, 1 – 30 м, 1 – 50 м. Учет с помощью фотоловушек дал несопоставимо низкий результат – 0.03 ос./1000 га. Скорость передвижения этого активного зверька обычно столь велика, что на него не успевают реагировать даже самые чувствительные фотоловушки. К тому же бурундук большую часть времени проводит в зарослях стланика, где не фиксируется камерами. Полученные результаты показывают, что учет бурундука с помощью фотоловушек невозможен.

**Птицы.** Описанная методика учета с помощью фотоловушек непригодна для определения численности птиц. Даже для белой куропатки (*Lagopus lagopus*), проводящей значительную часть времени на земле, попытка расчета плотности населения на гольцах дала низкий результат – 0.006 ос./1000 га (табл. 1), что примерно на 4 порядка ниже экспертной оценки этого показателя численности. Это связано с тем, что фотоловушки не могут зафиксировать большую часть перемещений птиц во время полета.

В то же время анализ съемок 8 установленных камер позволил расширить список видов птиц, регулярно или эпизодически посещающих горные пустоши в летне-осенний период – во время плодоношения кедрового стланика и на осеннем пролете. Так, фотоловушки показали, что в августе гольцы с куртинами стланика периодически посещают дикуша (*Falci pennis falci pennis*) и большая горлица (*Streptopelia orientalis*). Ранее эти виды считались нехарактерными для горных пустошей. Кроме этого, 7 июля 2023 г. впервые в горных тундрах Зейского заповедника зафиксирован на пролете средний кроншнеп (*Numenius phaeopus*); а 2 октября 2023 г. впервые отмечены на пролете сибирские горные вьюрки (*Leucosticte arctoa*). Фотоловушками также зарегистрированы на пролете полевой жаворонок (*Alauda arvensis*), белая трясогузка (*Motacilla alba*) и беингийская желтая трясогузка (*Motacilla tschutschensis*), ранее неоднократно отмечавшиеся на гольцах визуально. Камеры также засняли несколько видов птиц, характерных для горных тундр Зейского заповедника: кедровку (*Nucifraga caryocatactes*), ворона (*Corvus corax*), перепелятника (*Accipiter nisus*), белую куропатку (*Lagopus lagopus*).

### Выводы

Наше исследование показало возможности и ограничения использования фотоловушек в изучении фауны и животного населения горных пустошей хребта Тукурингра. Подтверждена относительная точность определения плотности населения на гольцах бурого медведя, рыси и заяц-беляка. Для них разработанный метод (Подольский и др., 2020) дал результаты сходные с данными стандартных учетов на горных пустошах и сопредельных участках Зейского заповедника (учет по встречам на маршрутах, многодневный оклад и др.). Вероятно, этот метод здесь применим и для других крупных млекопитающих, в первую очередь – россомахи, регулярно посещающей гольцы. Основываясь на полученных результатах, можно предположить, что для успешного учета упомянутых видов необходимо устанавливать среди горных пустошей не менее 8 камер на расстоянии не менее 500 м. Такие наблюдения особенно важны при регистрации и оценке основных параметров летне-осенних кормовых концентраций медведей в период созревания орешков кедрового стланика (сроки, динамическая плотность населения). С помощью фотоловушек установлено, что даже при среднем урожае плотность населения медведей на гольцах в августе 2023 г. (2.88 ос./1000 га) была в 15-16 раз выше, чем в среднем по лесным биотопам заповедника (0.18 ос./1000 га).

Для зайца-беляка, рыси и россомахи использование фотоловушек – оптимальный метод определения показателей численности на гольцах. Из-за преобладающей ночной активности и повышенной осторожности их учет по встречам на маршрутах среди горных пустошей практически невозможен. Зимний учет этих зверей по следам здесь также не эффективен: из-за сравнительно небольшой нагрузки на грунт и плотного ветрового наста зайцы, россомахи и рыси передвигаясь по гребням хребтов и открытым плакорам, практически не проваливаются в снег, а малозаметные следы когтей зайцев и россомах быстро заметаются ветром. Кроме того сложный рельеф, неравномерный

снежный покров (чередование участков с плотным ветровым настом и глубокими снежными надувами – более 1м), а главное – частые штормовые ветра, резко затрудняют проведение учетных маршрутов в зимний период.

Анализ полученных данных показал, что предлагаемый метод учета фотоловушками на гольцах неприменим к соболю, белке и азиатскому бурундуку. Плотность населения упомянутых видов, рассчитанная по данным фотоловушек, оказалась на несколько порядков ниже, чем при учетах стандартными методами. Вероятно, скорость передвижения этих активных зверьков часто бывает столь велика, что даже самые чувствительные фотоловушки не успевают сработать. К тому же упомянутые виды большую часть времени проводят на ветвях кедрового стланика или под пологом его зарослей, где не могут быть зарегистрированы камерами.

Описанная методика также непригодна для определения численности птиц. Это связано с тем, что фотоловушки не могут зафиксировать большую часть перемещений птиц во время полета. В то же время анализ съемок установленных камер позволил расширить перечень видов птиц регулярно или эпизодически посещающих горные пустоши, а также дополнить список орнитофауны Зейского заповедника: фотоловушки показали, что в конце лета гольцы с куртинами стланика посещали такие типичные лесные виды, как дикуша и большая горлица; впервые на территории Зейского заповедника отмечены средний кроншнеп и сибирские горные выюрки, останавливающиеся в горных тундрах во время осенних миграций. Вероятно, при дальнейшем использовании фотоловушек на гольцах сведения о составе орнитофауны горных пустошей и сроках пролета птиц через территорию Зейского заповедника могут быть существенно дополнены.

В заключение необходимо отметить, что природные особенности верхних высотных поясов хребта Тукрингра, специфика организации исследований в экстремальных условиях, технические возможности современных автоматических камер и разработанная методика учета определяют значительные перспективы использования фотоловушек для изучения фауны и населения зверей и птиц не только горных пустошей Зейского заповедника.

*Благодарности.* Авторы благодарны администрации Зейского государственного природного заповедника за организационную и техническую помощь в проведении исследований.

*Финансирование.* Работа выполнена по теме № FMWZ-2022-0001 госзадания Института водных проблем РАН «Исследования процессов гидрологического цикла суши и формирования водных ресурсов, геофизических процессов в водных объектах и их бассейнах, формирования экстремальных гидрологических явлений и динамики гидрологических систем с учетом изменяющихся климатических условий и антропогенных факторов», а также в рамках темы № 1-22-37-1 Зейского государственного заповедника «Динамика явлений и процессов в экосистемах Зейского заповедника и национального парка «Токинско-Становой».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беме Р.Л., Динец В.Л., Флинт В.Е., Черенков А.Е. 1998. Птицы. Энциклопедия природы России. Изд. 2-е доп. и перераб. / Ред. В.Е. Флинт. М.: ABF. 432 с.
- Васильев Н.Г., Матюшкин Е.Н., Куццов Ю.В. 1985. Зейский заповедник // Заповедники СССР. Заповедники Дальнего Востока. М.: Мысль. С. 92-112.
- Волков А.Е., Сузов С.Г. 2022. Опыт использования фотоловушек для оценки численности крупных млекопитающих Керженского заповедника // Труды государственного природного биосферного заповедника «Керженский». Нижний Новгород. Т. 10. С. 225-242.
- Гвоздецкий Н.А., Голубчиков Ю.Н. 1987. Горы. М.: Мысль. 399 с.
- Дарман Ю.А., Сторожук В.Б., Седаш Г.А. 2019. *Hydropotes inermis* (Cervidae) – новый вид для фауны России из национального парка «Земля леопарда» (Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. № 4 (3). С. 127-129.
- Желтухин А.С., Огурцов С.С. 2018. Фотоловушки в мониторинге лесных млекопитающих и птиц. Тверь: Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник. 54 с.
- Кастрикин В.А., Подольский С.А., Бабыкина М.С. 2020. Новый метод учета наземных животных с помощью автоматических камер на примере определения плотности населения косули (*CAPREOLUS PYGARGUS*) в Хинганском заповеднике // Поволжский экологический журнал. № 3. С. 307-317.
- Колесников Б.П. 1965. Геоботаническое районирование Дальнего Востока и закономерности размещения его растительных ресурсов // Вопросы географии Дальнего Востока. Вып. 7. С. 152-182.

- Коли Г. 1979. Анализ популяций позвоночных. М.: Мир. С. 214-270.
- Кузякин В.А., Челинцев Н.Г., Ломанов И.К. 1990. Методические указания по организации, проведению и обработке данных зимнего маршрутного учета охотничьих животных в РСФСР. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР. 51 с.
- Лисовский А.А., Шефтель Б.И., Савельев А.П., Ермаков О.А., Козлов Ю.А., Смирнов Д.Г., Стахеев В.В., Глазов Д.М. 2019. Млекопитающие России: список видов и прикладные аспекты // Сборник трудов Зоологического музея МГУ. Т. 56. М.: Товарищество научных изданий КМК. 191 с.
- Матюшкин Е.Н., Подольский С.А., Ткаченко К.Т. 2003. Рысь Евразии: эколого-географическая характеристика по регионам. Юг Дальнего Востока // Рысь. Региональные особенности экологии, использования и охраны. М.: Наука. С. 423-472.
- Перелешин С.Д. 1956. Основные вопросы охотничьего хозяйства СССР. М.: Изд-во Московского университета. 199 с.
- Подольский С.А., Кастрикин В.А., Красикова Е.К., Левик Л.Ю., Чемирская Д.С. 2020. Новый метод использования фотоловушек для оценки обилия и выявления характерных особенностей населения млекопитающих различных местообитаний на примере Зейского заповедника // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 2. С. 46-64.
- Подольский С.А., Кастрикин В.А., Левик Л.Ю., Гордеева Я.С. 2019. Методология использования фотоловушек для оценки обилия и сезонных изменений населения млекопитающих на примере Зейского заповедника // Байкальский зоологический журнал. № 4. С. 6-12.
- Подольский С.А., Красикова Е.К. 2003. Летне-осенние концентрации бурого медведя на гольцах хребта Тукурингра // Териофауна России и сопредельных территорий (VII съезд Териологического общества). Материалы Международного совещания, г. Москва, 6-7 февраля 2003 г. М. С. 267.
- Пучковский С.В., Сунцова Г.Л. 1991. Некоторые методические вопросы количественного изучения следов бурого медведя в связи с проблемой различения особей // Медведи в СССР. Новосибирск: Наука. С. 39-48.
- Русанов Я.С. 1986. Основы охотоведения. М.: Изд-во МГУ. 160 с.
- Рябицев В.К. 2002. Птицы Урала, Приуралья и Западной Сибири: справочник-определитель. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 608 с.
- Сорокина Л.И. 1977. Учет копытных // Охота и охотничье хозяйство. № 2. С. 38-39.
- Формозов А.И. 1990. Снежный покров в жизни млекопитающих и птиц. М.: Изд-во МГУ. 287 с.
- Karant H.U. 1995. Estimating Tiger *Panthera tigris* Populations from Camera-Trap Data Using Capture-Recapture Model // Biological Conservation. Vol. 71. P. 333-338.
- Nakashima Y., Fukasava K., Samejima H. 2018. Estimating Animal Density without Individual Recognition Using Information Derivable Exclusively from Camera Traps // Journal of Applied Ecology. Vol. 55. P. 735-744.
- Nakashima Y., Shun H., Etienne F. 2020. Landscape-scale Estimation of Forest Ungulate Density and Biomass Using Camera Traps: Applying the REST model // Biological Conservation. Vol. 214. P. 1-8.
- Rowcliffe J.M., Field J., Turvey S.T., Carbone C. 2008. Estimating Animal Density Using Camera Traps without the Need for Individual Recognition // Journal of Applied Ecology. Vol. 45. P. 1228-1236.

## ОРИБАТИДНЫЕ КЛЕЩИ РЕПЕТЕКСКОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА

© 2024 г. П.Р. Хыдыров

Туркменский государственный педагогический институт им. С.Сейди  
Туркменистан, г. Туркменабат, ул. Шабенде, д. 7. E-mail: [dolychocybe@mail.ru](mailto:dolychocybe@mail.ru)

Поступила в редакцию 18.03.2024. После доработки 01.05.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Приводятся результаты исследований по изучению видового многообразия и экологии орибатидных клещей (Acari, Oribatida), обитающих на территории Репетекского биосферного заповедника, расположенного в Восточной части Каракумов. Выявлены видовой состав и обилие орибатидных клещей в основных фитоценозах пустынь Каракумов. В частности, на подстилке, в почве под деревьями и кустарниками обнаружено 36 видов орибатидных клещей, в т.ч. 10 новых для фауны Туркменистана. Исследованиями было установлено образование массовых скоплений доминирующего вида *Epilohmannia cylindrica* и субдоминантов *Oribatula skrjabini*, *Psammogalumna thysanura*, *Schelorbitates turkmenistaniensis*, *Hemileius turanica*, проникающих во внутренние слои растительных остатков. Их численность достигает 50-400 экземпляров в каждом 1 м<sup>2</sup>. В работе приводится сравнительный анализ сезонной динамики численности доминирующего вида *Epilohmannia cylindrica* в верхнем слое (1-10 см) песчаных почв. Наблюдениями установлено преобладание видового многообразия и численности орибатид в пустыне Каракумы по сравнению с другими группами почвенных клещей. Приведены данные о значении орибатидных клещей в деструкции подстилки, а также опада, образующегося в результате насыпи песком растительных остатков.

**Ключевые слова:** клещ, почва, пустыня, приспособление, экология, фитоценоз, растение.

**DOI:** 10.24412/1993-3916-2024-4-107-112

**EDN:** MLWGMX

Орибатидные клещи являются важным звеном среди почвенных микроартропод. Исследованиями акарологов показано обилие видового многообразия орибатид в Центральной Азии (Баяртогтох, 2010; Христов, 1973; Akrami, 2016; Akrami, Subías, 2007; Arbab, Akrami, 2023; Bayartogtokh, 2007; Farzaneh, Akrami, 2016; Iranpoor, Akrami, 2016; Jabbari et al., 2021; Ordouni et al., 2023).

Почвенные клещи играют огромную роль в биогеоценозе пустыни, активно участвуя в процессе разложения растительных остатков (Каплин, 1978; Криволицкий, 1966, 1975; Криволицкий, Ягдыев, 1973). Однако фауна, экология и практическое значение орибатидных клещей в Туркменистане изучены недостаточно, особенно в Восточной части Каракумов.

Целью нашего исследования является анализ видового многообразия и ряда экологических особенностей свободноживущих орибатидных клещей в Репетекском биосферном заповеднике, расположенного в Восточных Каракумах в Туркменистане.

### Материалы и методы

В 2018 и 2020-2021 гг. мы проводили полевые наблюдения и сбор материала в ландшафте крупногрядковых песков на территории Репетекского биосферного заповедника, общая площадь которого составляет 34.6 тыс. га. Почвенные образцы отбирались с помощью металлической рамки 10 × 10 см, в объеме 1 дм<sup>3</sup>. Для изъятия проб металлическая рамка вдавливалась в почву, затем полученные образцы помещались в полиэтиленовый мешочек и специальный контейнер, потом транспортировались в город Туркменабат на Кафедру биологии с методикой преподавания Туркменского государственного педагогического института имени Сейитназара Сейди.

Выгонка клещей из проб почвы и других субстратов проводилась по общепринятой методике Тулгрена-Берлеза (Буланова-Захваткина, 1967; Гиляров, 1978). В дальнейшем клещи из чашек Петри переносились для фиксации во флаконы с 70% спиртом. Выборка клещей осуществлялась под

стереомикроскопом МБС-9. Клещи помещались на предметные стекла в гуммиарабиковую смесь (жидкость Фора-Берлезе) под стереомикроскопом и накрывались покровным стеклом. Микропрепараты просушивались в термостате в при температуре +50°C в течение 10 суток.

Всего было проанализировано 950 образцов почвы из-под деревьев и кустарников разных фитоценозов Каракумов, 600 образцов из подстилки деревьев и кустарников, также из опада гниющих растительных остатков, образовавшихся после летней засухи в результате насыпа песчаной почвой. Извлечено и зафиксировано в этиловый спирт 52000 экз. клещей. Для определения видового состава клещей приготовили 1100 микропрепарата. При определении клещей использовали микроскоп Биолам-М.

### Результаты и обсуждение

Видовой состав и обилие орибатидных клещей в фитоценозах песчаной пустыни приведен в таблице.

Всего в Репетекском биосферном заповеднике нами обнаружено 36 вида орибатидных клещей. Из них 10 видов были зарегистрированы впервые в фауне Туркменистана: *Tamnacus deserticola*, *Ramusella krivolutskyi*, *Sellnickochtonius zelawaiensis*, *Papillacarus aciculatus*, *Galumna kazakhstani*, *Galumna flagellata*, *Berlesezetes ornatissimus*, *Berniniella sigma*, *Bipassalozetes linearis*, *Liochtonius evansi*.

**Таблица.** Орибатидные клещи Репетекского биосферного заповедника.

№	Таксоны	Фитоценозы					
		Илаковый бело-саксаульник		Илаково-разнотравный чёрно-саксаульник		Эркек селиновый кандымник	
		1*	2	1	2	1	2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Инфраотряд Oribatida Duges, 1833 Семейство Parhypochthoniidae Grandjean, 1932 <i>Parhypochthonius aphidinus</i> Berlese, 1904	–	+*	–	–	–	–
2	Семейство Sphaerochthoniidae Grandjean, 1947 <i>Sphaerochthonius splendidus</i> Berlese, 1904	+	++	+	++	–	–
3	Семейство Eniochthoniidae Grandjean, 1947 <i>Hypochthoniella minutissima</i> Berlese, 1903	–	+	–	–	–	–
4	<i>Liochtonius evansi</i> , Forsslund, 1958	+	–	–	+	–	+
5	Семейство Brachychthoniidae Thor, 1934 <i>Brachychthonius bimaculatus</i> Willman, 1936	+	++	–	++	–	–
6	<i>Sellnickochtonius zelawaiensis</i> Sellnick, 1928	+	+	–	+	+	–
7	Семейство Passalozetidae Grandjean, 1954 <i>Bipassalozetes perforatus</i> Berlese, 1910	+	+	+	+	–	–
8	<i>Bipassalozetes elegans</i> Sitnikova, 1975	++	+	++	+	–	–
9	<i>Bipassalozetes hispanicus</i> Mihelcic, 1955	++	+	++	+	–	–
10	<i>Bipassalozetes linearis</i> Higgins et Woolley, 1962	+	–	+	–	–	+
11	Семейство Eremaeoidae Oudemans, 1900 <i>Eueremaus oblongus</i> Koch, 1835	–	–	–	+	–	–
12	Семейство Lohmanniidae Berlese, 1916 <i>Tamnacus smirnovi</i> Bulanova-Zachvatkina, 1978	–	–	–	+	–	–
13	<i>Tamnacus longisetosus</i> Bulanova-Zachvatkina, 1978	–	–	–	+	–	–
14	<i>Tamnacus deserticola</i> Grandjean, 1934	+	+	+	+	+	+
15	<i>Tamnacus elongatus</i> Krivolutsky, 1971	–	+		+	–	–

## Продолжение таблицы.

1	2	3	4	5	6	7	8
16	<i>Papillacarus aciculatus</i> Berlese, 1904	–	–	+	–	–	–
17	Семейство Epilohmanniidae Oudemans, 1923 <i>Epilohmannia cylindrica</i> Berlese, 1904	+++	++	++	++	–	+
18	Семейство Gymnodamaeidae Grandjean, 1954 <i>Jacotella austriaca</i> Willman, 1935	–	–	–	–	+	–
19	Семейство Nanhermanniidae Sellnick, 1928 <i>Nanhermannia nana</i> Nicolet, 1855	–	+	–	+	–	–
20	Семейство Oribatulidae Thor, 1929 <i>Oribatula skrjabini</i> Bulanova-Zachvatkina, 1967	++	+++	++	++	–	+
21	<i>Oribatula frisiae</i> Oudemans, 1900	+	+++	+	++	–	–
22	Семейство Hemileiidae Balogh et P. Balogh, 1984 <i>Hemileius turanica</i> D. Krivolutsky, 1966	+	++		++	++	++
23	<i>Urubambates schachtachtinskoi</i> Kulijew, 1961	++	+	++	+	–	–
24	Семейство Scheloribatidae Grandjean, 1933 <i>Schelorbates laevigatus</i> C.L. Koch, 1835	++	–	–	++	–	–
25	<i>Schelorbates turkmenistaniensis</i> Subbotina, 1987	++	++	++	–	–	++
26	Семейство Oppiidae Sellnick, 1937 <i>Moritzoppia unicarinata</i> Paoli, 1908	+	+++	–	++	–	+
27	<i>Berniniella sigma</i> Strenzke, 1951	–	–	–	++	–	++
28	<i>Ramusella krivolutskyi</i> Kulijev, 1966	–	+	–	–	–	–
29	Семейство Ceratozetidae Jacot, 1925 <i>Ceratozetella sellnicki</i> Rajski, 1958	+	+	–	+	–	–
30	Семейство Suctobelbidae Jacot, 1938 <i>Suctobelbella tschabovskyi</i> Krivolutskyi, 1966	+	+	–	+	–	–
31	Семейство Galumnidae Jacot, 1925 <i>Galumna dimorpha</i> G. Krivolutzkaja, 1952	++	++	–	++	–	–
32	<i>Galumna lanceata</i> Oudemans, 1900	+	+	–	+	–	–
33	<i>Galumna flagellata</i> Willman, 1923	+	+	+	+	–	+
34	<i>Galumna kazakhstani</i> Krivolutzkaja, 1952	+	++	–	+	++	–
35	<i>Psammogalumna thysanura</i> Krivolutzkaja, 1952	++	+++	++	++	+	+
36	Семейство Microzetidae Grandjean, 1936 <i>Berlesezetes ornatissimus</i> Berlese, 1913	+	–	–	+	–	+
Всего видов		25	26	14	29	6	12

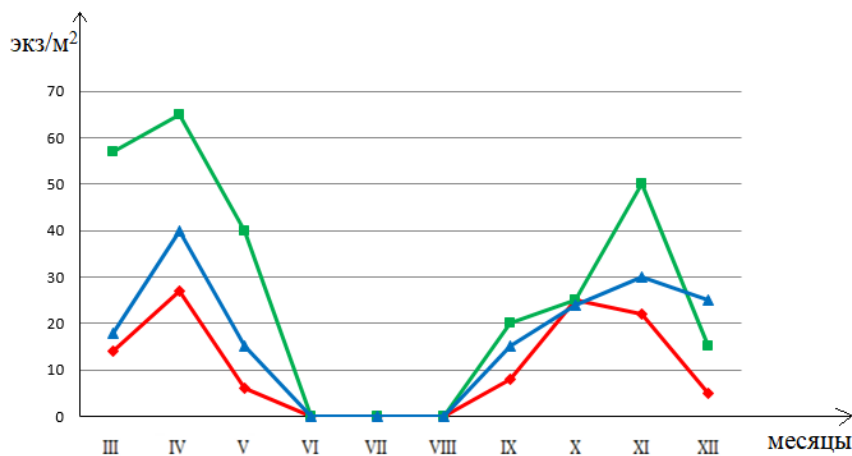
**Примечания к таблице:** 1\* – почва, 2 – подстилка, опад; \*+ – редкие виды, ++ – обычные, +++ – многочисленные; таксоны приведены по системе L.S. Subías (2016).

Частота встречаемости клещей в почве, подстилке и опаде в разных фитоценозах неодинакова. В илаковых белосаксаульниках, формирующихся на мелкобугристых песках, где растут в основном саксаул белый (*Haloxylon persicum* Bunge et Buhse) и осока вздутая (*Carex physodes* Bieb), встречаются 26 видов оribатид. Илаково-разнотравно-однолетние солянковые чёрносаксаульники, образующихся в песках на долинных понижениях с доминированием саксаула чёрного (*Haloxylon aphyllum* Minkw.), осоки вздутой и эфемеров, характеризуются самым высоким видовым разнообразием оribатидных клещей – 29 видов. На барханных песках, где преобладают кандым древовидный (*Calligonum arborescens* Litv.) и селин карелина (*Stipagrostis karelinii* Trin. et Rupr.), в почве зарегистрировано лишь 12 видов клещей. Встречаемость оribатид в подстилке и опаде в чёрносаксаульниках и кандымниках в два раза выше, чем в почве, но в белосаксаульных лесах выявлен их одинаковый состав.

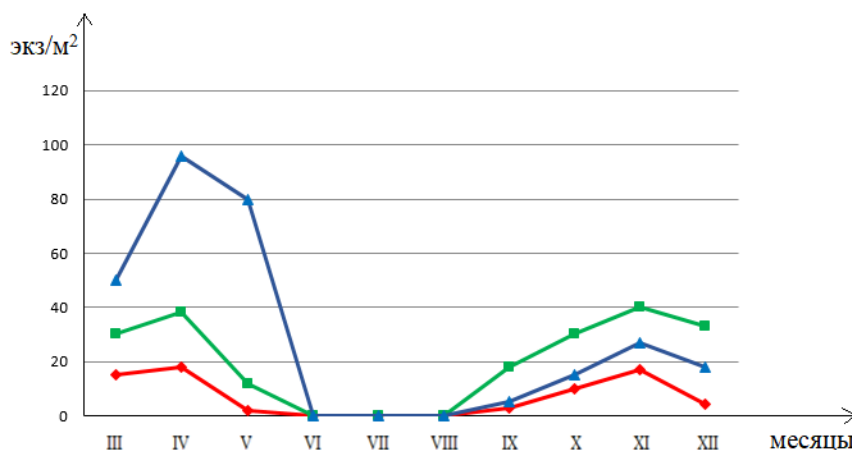
Таким образом, фаунистический состав Oribatida для биоценоза пустынь оказался достаточно богатым. Обнаружение 22 видов орибатида, свойственных только пустынным фитоценозам, которые составляют 21% выявленного нами видового состава Oribatida в Туркменистане, определяет высокую степень его специфичности (Нудугов, 2021; Хыдыров, 2022).

В цикле развития у многих видов панцирных клещей половое размножение часто чередуется с партеногенезом (Рябинин, Панков, 1987). Такое интенсивное размножение является главным фактором их доминирования по численности и биомассе среди почвенных беспозвоночных животных в пустыне (Каплин, 1978).

Клещи часто встречаются в верхних слоях почвы 1-10 см и подстилке. Наблюдениями выявлено, что для положительного роста и развития клещей оптимальный уровень влажности должен составлять 5-25%, а температуры почвы – от +3° до +25°С. Доминирующий вид *Epilohmannia cylindrica* и субдоминанты *Oribatula skrjabini*, *Psammogalumna thysanura*, *Schelorbates turkmenistaniensis*, *Hemileius turanica* весной и осенью образуют массовые скопления в верхних слоях почвы. Результаты изучения динамики численности доминирующего вида *E. cylindrica* в фитоценозах пустыни по сезонам года приведены на рисунках 1 и 2.



**Рис. 1.** Средняя численность клеща *Epilohmannia cylindrica* в почве фитоценозов в 2020 г. Условные обозначения для рис. 1-2: ■ – илаковый белосаксаульник, ▲ – илаковых чёрнсаксаульник, ◆ – эркек селиновый кандымник.



**Рис. 2.** Средняя численность клеща *Epilohmannia cylindrica* в почве фитоценозов в 2021 г.

Как видно из графиков, численность *E. cylindrica* в фитоценозах достигает максимума в марте и апреле. Интенсивность роста численности клещей связана в первую очередь с благоприятными климатическими условиями средней влажности и температуры.

В летний период клещи не выдерживают перегрева почвы, поэтому часть из них укрывается в норах грызунов. В сентябре выжившие в период засухи оribатидные клещи выходят из укрытий и начинают интенсивно размножаться. Осенью численность *E. cylindrica* достигает пика в илаковых белосаксаульниках. В наших наблюдениях по сезонному изменению динамики численности клеща выявлена её низкая численность в декабре (рис. 1, 2).

Мы установили преобладание видового многообразия и численности оribатид в пустыне в сравнении с другими группами почвенных клещей. Почвенные мезостигматические и простигматические клещи, обитающие в песчаных пустынях, малочисленны. В трофической цепи биогеоценоза пустынь большинство хищных видов гамазид, бделлид, кунаксид и анистид играет роль консументов первого порядка.

Панцирные клещи, по сравнению с другими группами членистоногих, хорошо приспособились к жизни на суше (Гиляров, 1970). Оribатидные клещи в пустынях обитают в верхнем слое почвы. Наличие целостного и пигментированного хитинового панциря у оribатид в отличие от других групп клещей позволяет им широко приспособиться к жизни в аридных условиях. Полевыми наблюдениями доказана изменчивость окраски тела оribатид в пустыне: она становится более тусклой сероватой по сравнению с цветами особей, обитающих в других ландшафтах. Кроме этого, мы выявили морфологическую изменчивость в размерах щетинок лапок и голени ног в группе видов, преимущественно обитающих в поверхностных слоях почвы: *Galumna dimorpha*, *Schelorbitates laevigatus*, *Oribatula skrjabini*, *Sphaerochthonius splendidus*, *Brachychthonius bimaculatus* и *Epilohmannia cylindrica*. Щетинки лапок и голенных суставов указанных нами видов явно длиннее и толще, в отличие от особей, живущих в других ландшафтах. По нашему мнению, изменчивость хетома ходильных конечностей клещей приводит к усилению их опорной функции на поверхности почвы в аридных условиях обитания.

Значение оribатидных клещей в биогеоценозе пустыни выражается в деструкции органических веществ, а именно, в процессе употребления ими в пищу подстилки и растительного опада. Они занимают ту же экологическую нишу, что и насекомые-сапрофаги. Оribатидные клещи кроме участия в разложении органических остатков своими ходами разрыхляют почву и улучшают её аэрацию.

### Выводы

Исследованиями на территории Репетекского биосферного заповедника обнаружено 36 видов оribатидных клещей, из них 10 видов зарегистрированы впервые в фауне Туркменистана.

Выявлена высокая степень специфичности оribатидных клещей, распространенных в фитоценозах пустынь, так как 21% видов встречается только в песчаных почвах.

Сравнительное изучение сезонной динамики численности доминирующего вида *Epilohmannia cylindrica* в почве различных фитоценозов показало её закономерное возрастание во влажные и теплые времена года.

Исследованиями доказано, что в песчаных пустынях оribатидные клещи обитают преимущественно в верхнем слое почвы. Прочный хитиновый панцирь, покрывающий тело клеща предохраняет его от воздействия высоких температур в условиях Каракумов.

*Благодарности.* Автор выражает благодарность кандидату биологических наук Н.Б. Джумаеву за определение видов растений и Н.Ш. Мамедову за помощь в редактировании текста статьи на русском языке.

*Финансирование.* Исследование выполнено координируемой Академией наук Туркменистана по теме «Биоразнообразие почвенных клещей различных систематических групп (Acari: Sarcotiformes, Trombidiformes) и их экология», № регистрации ТО 10.00.2313, сроком на 2020-2025 гг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баяртогтох Б. 2010. Панцирные клещи Монголии (Acari: Oribatida). М.: Товарищество научных изданий КМК. 372 с.
- Буланова-Захваткина Е.М. 1967. Панцирные клещи-Оribатиды. М.: Высшая школа. 253 с.
- Гиляров М.С. 1970. Закономерности приспособления членистоногих к жизни на суше. М.: Изд-во АН СССР. 272 с.

- Гиляров М.С. 1978. Методы количественного учёта почвенных клещей // Определитель обитающих в почве клещей. М.: Наука. С. 9-13.
- Каплин В.Г. 1978. Комплексы почвенных беспозвоночных животных песчаных пустынь южной подзоны. Ашхабад: Ылым. С. 159.
- Криволицкий Д.А. 1966. О панцирных клещах (Oribatei, Acariformes) почв Средней Азии // Зоологический журнал. Т. 45. № 11. С. 1629-1639.
- Криволицкий Д.А. 1975. Панцирные клещи в почвах под лесными насаждениями Туркмении // Насекомые как компоненты биогеоценозов саксаулового леса. М.: Изд-во АН СССР. С. 215-222.
- Криволицкий Д.А., Ягдыев А. 1973. Материалы по фауне панцирных клещей (Acariformes, Oribatei) Туркмении // Известия АН Туркменской ССР. Серия биологических наук. № 5. С. 83-85.
- Рябинин Н.А., Панков А.Н. 1987. Роль партеногенеза в биологии панцирных клещей // Экология. № 4. С. 62-64.
- Христов В.В. 1973. Фауна и ландшафтное распределение панцирных клещей Таджикистана // Зоологический журнал. Т. 62. № 4. С. 606-608.
- Хыдыров П.Р. 2022. Биоразнообразие и экологические особенности панцирных клещей на Юго-Западе Копетдага // Аридные экосистемы. Т. 28. № 3 (92). С. 101-106. [Khydyrov P.R. 2022. The Biodiversity and Ecological Peculiarities of Shell Ticks in Southwestern Kopetdag // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 3. P. 321-326.]
- Akrami M.A. 2016. Oribatid Mites (Acari: Oribatida) from the Biosphere Reserve Dashte Arjan and Parishan, and Chehel Cheshmeh Region (Fars Province) // Persian Journal of Acarology. Vol. 5. No. 3. P. 189-205.
- Akrami M.A., Subías L.S. 2007. Oppiid Mites (Acari: Oribatida) from Mazandaran Province (Northern Iran), with a Description of *Medioppia bipectinata* sp.n. // Systematic and Applied Acarology. Vol. 12. P. 237-243.
- Arbab Y., Akrami M.A. 2023. Oribatid Mites (Acari, Sarcoptiformes) of Sistan and Baluchestan Province, Iran, with New Records // Journal of Insect Biodiversity and Systematics Vol. 9. No. 4. P. 761-774.
- Bayartogtokh B. 2007. Fauna and Community Soil Oribatid Mites of Mongolia (Acari: Oribatida) // Dissertation Submitted for the Degree of doctor of Science in Biology. М.: Institute of Ecology and Evolution. Vol. 1, 2. 862 p.
- Farzaneh T., Akrami M.A. 2016. Oribatid Mites (Acari: Oribatida) of Mashhad Township, Razavi Khorasan Province, Iran // Linzer biologische Beiträge. Vol. 48. No. 1. P. 395-403.
- Khydyrov P.R. 2021. Agrobiosenozlardaky çanakly sakyrtygalaryň deňeşdirme barlagynyň netijeleri // Türkmenistanda Ýlym we tehnika. No. 5. P. 27-32.
- Iranpoor A., Akrami M.A. 2016. Oribatid Mites (Acari: Oribatida) from the Biosphere Reserve Dashte Arjan and Parishan, and Chehel Cheshmeh Region (Fars Province) // Persian Journal of Acarology. Vol. 5. No. 3. P. 189-205.
- Jabbari M., Eshaghi-Rad J., Hashemi-Khabir Z., Mousavi-Mirkala S.R. 2021. Oribatid Mite (Acari, Oribatida) Richness and Diversity in Oak Forests of West Azerbaijan Province (Northwestern Iran) // Bosque Valdivia – Chile. Vol. 42. No. 1. 7 p.
- Ordouni F., Ramroodi S., Akrami M.A., Rakhshani E. 2023. Oribatid Mites (Acari: Oribatida) from Southeastern Iran, with Supplementary Description of *Verachthonius cf. laticeps* (Brachychthoniidae) // Persian Journal of Acarology. Vol. 12. No. 2. P. 173-188.
- Subías L.S. 2016. Listado sistemático, sinonímico y biogeográfico de los ácaros oribátidos (Acariformes: Oribatida) Del mundo. No. 60. P. 3-305.

УДК 91.913 (904), 551.8; 910.26

## ДРЕВНИЕ АГРОАНДШАФТЫ ДАРХАТСКОЙ КОТЛОВИНЫ (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ)

© 2024 г. Т.Н. Прудникова

*Центр биосферных исследований Республики Тыва  
Россия, 667007, г. Кызыл, ул. Улуг-Хемская, д. 14. E-mail: tprudnikova@inbox.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2024. После доработки 01.08.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Согласно дистанционным исследованиям (дешифрирование космических снимков), Дархатская котловина Северной Монголии – это малонаселенная скотоводческая территория, которая в прошлом являлась областью развитого земледелия. Весьма многочисленные земельные наделы распознаются на концевых разливах рек, стекающих с её горного обрамления, озерных и речных террасах, поймах, делювиально-пролювиальных склонах, на абсолютных отметках от 1535 до 1700 и более метров н.у.м. БС. Среди широкого почвенного диапазона здесь присутствуют плодородные черноземы, каштановые и темно-каштановые почвы. Геологическая позиция региона и приуроченность к юго-западной периферии Байкальского рифта способствовали как формированию котловины, так и современной сейсмической её активности, проявлениям базальтоидного вулканизма, а также появлению «региональной тепловой аномалии» (Вилор и др., 2019). Котловина также относится к Хубсугульскому верхнерифейско-кембрийскому фосфоритоносному бассейну, здесь известны месторождения и многочисленные проявления фосфоритов – основы минеральных удобрений (Ильин, 1973).

Длительная история формирования рельефа Дархатской котловины привела к обогащению в большей или меньшей степени ее четвертичных отложений полезными для земледельческих практик фосфорными соединениями. Современный вулканизм и процессы континентального рифтогенеза способствовали возникновению на этой территории термальных источников, здесь известны азотные термы, являющиеся своего рода жидким азотным удобрением (Монгольская Народная Республика, 1990).

Совокупность этих особенностей: плодородные почвы, тепловая аномалия Байкальского рифта, присутствие азотных терм, а также месторождений и проявлений фосфоритов, продуктов их разрушения, обогащающих почву, – способствовали развитию здесь земледелия. Возможную роль в развитии земледельческих практик на этой территории имели проявления кайнозойского базальтоидного вулканизма, обуславливающие присутствие плодородного вулканического пепла, а также процессы средневековой вулканической активизации (Аржанников и др., 2017). Немаловажными причинами являются и социально-политические события. Согласно проведенному ранее анализу древнего земледелия аридных территорий Центральной Азии (Прудникова, 2020), максимальное его развитие в Дархатской котловине происходило в раннем средневековье – времени, относимом к малому климатическому оптимуму.

*Ключевые слова:* Северная Монголия, Дархатская котловина, дешифрирование космических снимков, древние агроландшафты, древнее земледелие, раннее средневековье.

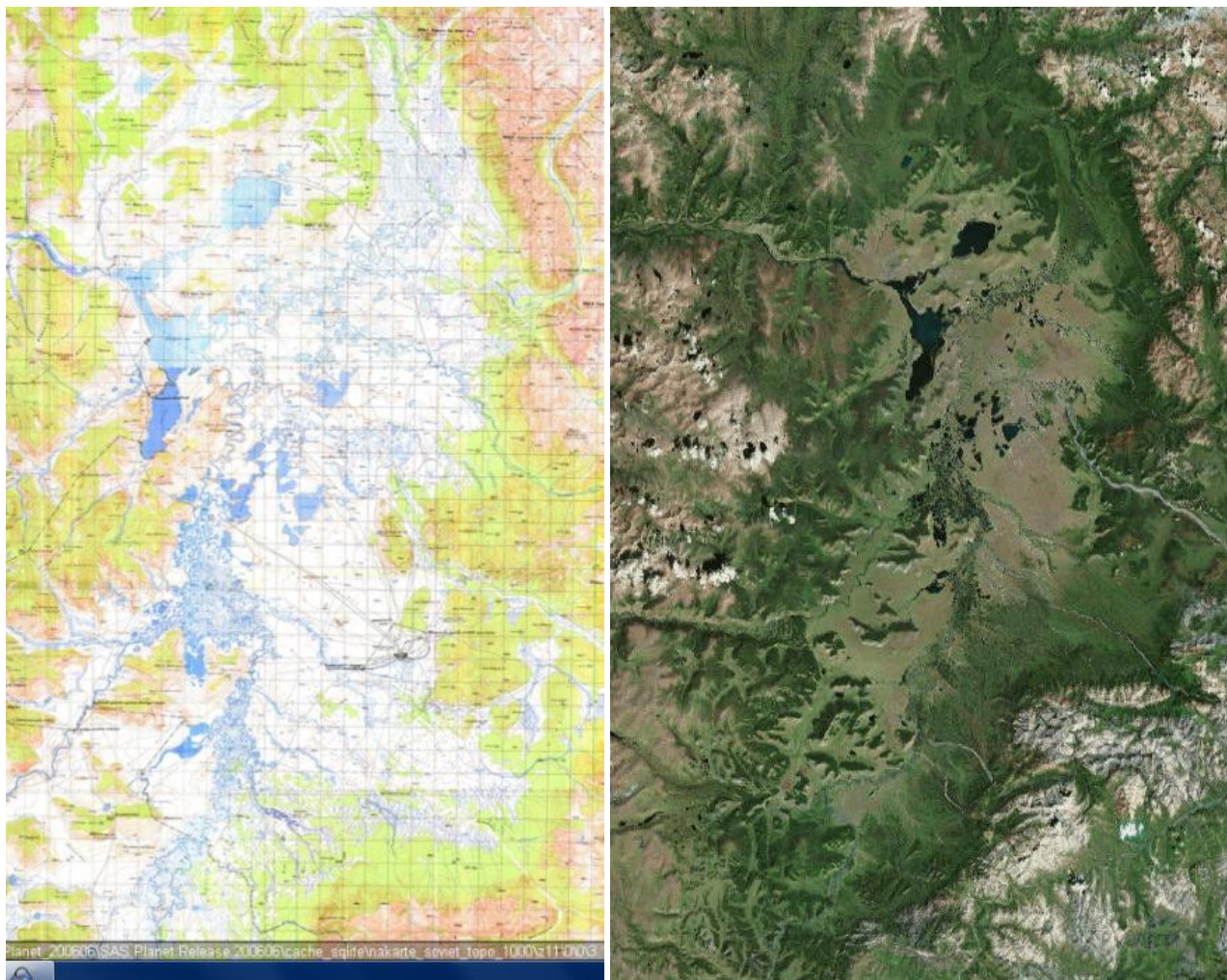
**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-113-125**

**EDN: OBRLQY**

Дархатская котловина расположена в северной Монголии между хребтами Улаан-Тайга и Хорьдолын-Сарьдиг-Нуру и в орографическом отношении относится к Западному Прихубсугулю – части Саяно-Тувинского нагорья. Её протяженность с севера на юг – около 120 км, с запада на восток – 40-50 км, абсолютные отметки – от 1535 до 1700 м н.у.м. БС. Площадь составляет около 4270 км<sup>2</sup>.

В административном отношении котловина относится к Цаган-Нур, Улан-Ула и Рэнчинлхумбэ сомонам, Хубсугул аймаку. Дархатская котловина – крупная сухоподольная впадина байкальского типа. С запада она ограничена системой высоко- и среднегорных хребтов Шихидского нагорья

с абсолютными высотами 2000–3350 м н.у.м. БС. Она богата озёрами и реками, крупнейшими из которых являются оз. Доод-Цагаан-Нуур и р. Шишгид-Гол (монгольское наименование Верхнего Енисея). Этот район относительно отдалённый, труднодоступный и *в настоящее время* (прим. автора) – слабозаселенный (Нямхуу Мянганбуу, 2012; рис. 1).



**Рис. 1.** Дархатская котловина: слева – топографическая карта М 1:100000, справа – космический снимок (использованы программы SAS Планета, ESRI Arc GIS Clarity).

### Материалы и методы

Исследование древней ирригации в Дархатской котловине проводилось в русле междисциплинарного направления на стыке геолого-географического знания, истории. При этом были применены дистанционный, картографический, геологический, сравнительно-исторический методы анализа, а также методы сравнений и аналогий.

Среди дистанционных методов был использован преимущественно ландшафтный метод дешифрирования космоснимков (визуальное дешифрирование), основанный на изучении по фотоизображению общих закономерностей ландшафта и индикационных связей между отдельными природными элементами. В работе использовались базы данных Google.Earth, а также программы SASPlanet-12-2020, ESRI/ESRI, ArcGIS.

Дистанционные методы включают 1) аэрофотометоды – дешифрирование космоснимков, что дает возможность выявить древние агроландшафты, определить их дешифровочные признаки и закономерности расположения земельных наделов, оросительных систем, 2) ландшафтно-геоморфологический метод – для определения ландшафтов и их особенностей, 3) структурно-

морфологический метод – для выявления типов агроландшафтов (систем орошения) и их последующей систематизации. С помощью этих методов были определены масштабы распространения земледелия в котловине. Основным дешифрировочным признаком агроландшафтов (оросительных каналов, контуров земельных наделов) на космоснимках являются прерывистые линии различной толщины, подчеркнутые более темным изображением грунта или тенью при боковом освещении. Плановое изображение орошаемых земель различных исторических эпох четко различается деталями топографии и оросительных систем, создавая на снимках характерный рисунок. Дистанционные методы (дешифрирование космических снимков) были ранее использованы автором для исследования древнего земледелия аридных территорий Центральной Азии (Прудникова, 2020).

Картографический метод предусматривает привязку оросительных систем к топооснове, определение абсолютных отметок уровней каналов, площадей древнего орошения. Геологический метод применялся для изучения геологического строения района, что является ключом в понимании своеобразия рельефа и ландшафтов, почвообразования, присутствия полезных ископаемых, определяет степень водонасыщенности горных пород и рыхлых отложений. Исторический, сравнительно-исторический методы потребовались для изучения общей истории развития земледелия, с целью определения положения Дархатской котловины в древнем земледельческом мире. Методы сравнений и аналогий, несмотря на появление многих новых в географических науках, остается весьма актуальным. Позволяет, по аналогии с изученными районами, используя дешифрировочные эталоны, понять историю развития региона, привести возрастную корреляцию древней ирригации.

Были использованы материалы Геологической библиотеки «GeoKniga» (2024), национальный атлас «Монгольская Народная Республика» (1990), топографические карты, исторические справки, научные публикации, литературные источники, Интернет-ресурсы и полевые наблюдения.

### Результаты и обсуждение

*Геологическое строение.* Дархатская котловина приурочена к протерозойскому структурному этажу с элементами верхнедокембрийского структурного яруса Тувино-Монгольского массива и входит в состав Хубсугульского фосфоритоносного бассейна или прогиба. Разрез верхнерифейско-кембрийских отложений бассейна расчленяется на нижнюю дархатскую серию и верхнюю хубсугульскую. В хубсугульской серии, объединяющей мощный комплекс карбонатных пород, на территории котловины сосредоточены 2 крупных месторождения и 15 проявлений фосфоритов<sup>1</sup>, приуроченных преимущественно к субмеридиональной зоне долины р. Шишгид-Гол и ее притокам (Ильин, 1973; рис. 2). Содержание  $P_2O_5$  в наиболее богатых залежах – более 30%. Мощность фосфоритовых залежей – до 10 и более метров.

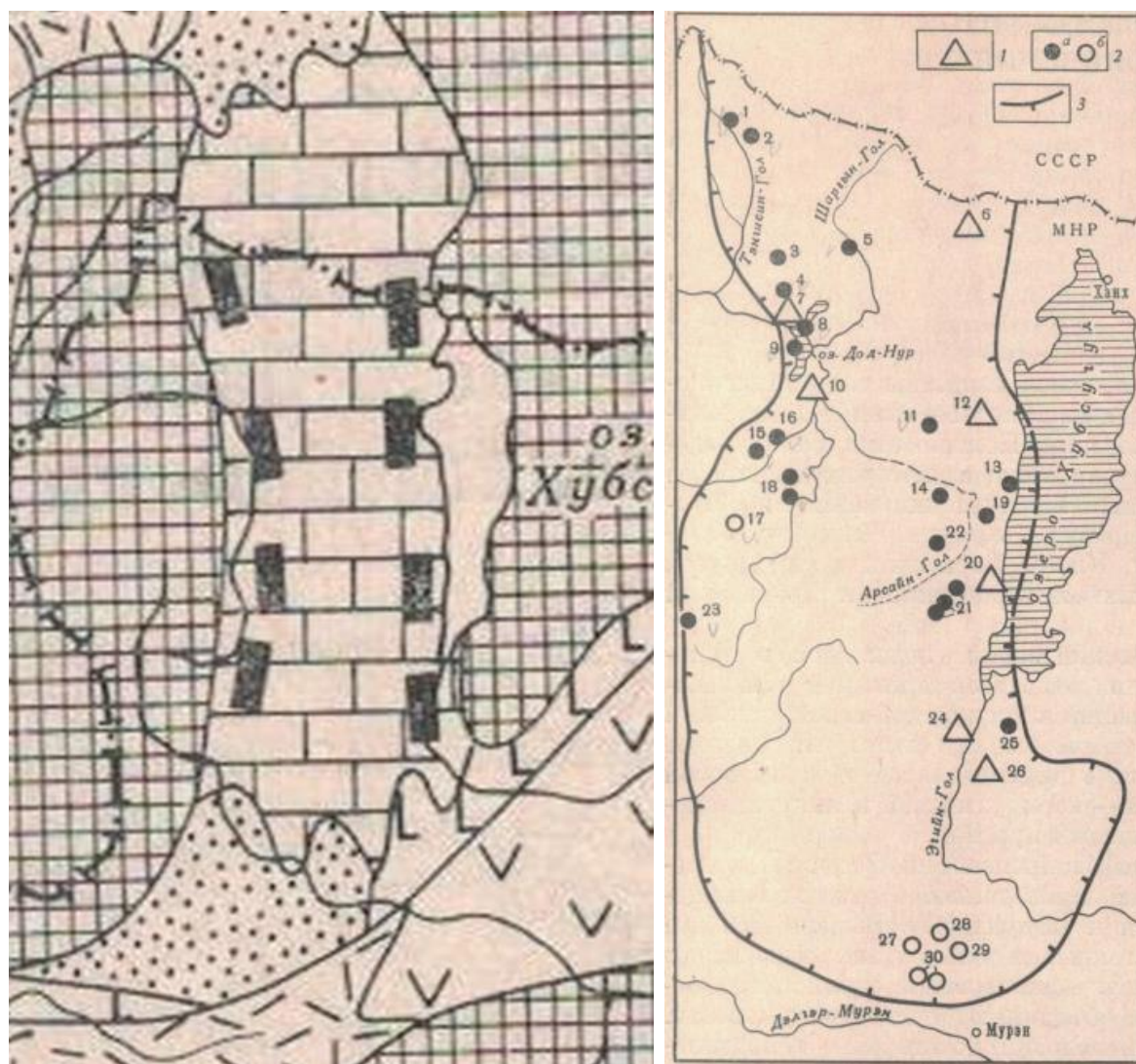
Длительная история геологического развития территории и финальный ее этап – формирование котловины и Дархатского озера, способствовали постоянному разрушению фосфоритовых залежей, накоплению фосфорных соединений в перекрывающих залежи отложениях, формируя брекчии или просто обогащенные фосфором породы. Вмещающие фосфориты доломиты, кремни, известняки, разнообразные брекчии и конгломераты имеют повышенное содержание  $P_2O_5$  до 10% и более.

Делювиально-пролювиальные отложения, вмещающие высыпки фосфоритов, озерные и речные образования, несущие продукты разрушения фосфоритовых залежей – все внесло свой вклад в обогащении современного почвенного покрова природными минеральными компонентами, делая его более плодородным.

---

<sup>1</sup> Фосфориты – осадочные горные породы, более чем на 50% сложенные фосфатными минералами. Они являются важным полезным ископаемым как сырье для производства минеральных удобрений. Отличным удобрением считается фосфоритовая (фосфоритная) мука, которую получают путем дробления и размола фосфоритов: она содержит 19-30%  $P_2O_5$  в виде  $Ca_3(PO_4)_2$ . Поскольку фосфат кальция малорастворим в воде, мука может усваиваться растениями только на кислых почвах (подзолистых и торфяных), в которых  $Ca_3(PO_4)_2$  постепенно переходит в доступный растениям дигидрофосфат  $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ . Усвоению этой муки благоприятствует тонкость помола, а также внесение её в почву совместно с кислыми удобрениями, например, с  $(NH_4)_2SO_4$ . Основным достоинством фосфоритной муки как удобрения является её низкая стоимость, а также экологическая безвредность и длительное последствие.

Важное место в современной геологической позиции имеют принадлежность котловины к Байкальской рифтовой зоне, связанные с ней (рифтовой зоной) проявления кайнозойского вулканизма.



**Рис. 2.** Схема расположения фосфоритоносных территорий в районе оз. Хубсугул. Слева – литолого-фациальная схема верхнего рифея – нижнего кембрия Хубсугульского фосфоритоносного бассейна, справа – схема расположения месторождений фосфоритов и фосфатопоявлений. *Условные обозначения:* черные прямоугольники – крупные фосфоритовые залежи, 7 – Хогоргаинское месторождение, 10 – Цаганнурское месторождение (Ильин, 1973).

Монголия была ареной активной вулканической деятельности на протяжении долгой геологической истории. Отдельные периоды наиболее интенсивного внутриконтинентального магматизма с наибольшими объемами извергнутых пород отмечаются в перми, юре, мелу, кайнозое (Геншафт, Салтыковский, 2000).

Согласно литературным данным, «основная масса кайнозойских базальтов северной части Монголии сосредоточена в пределах Хангайского нагорья и его отрогов, где они образуют отдельные... вулканические массивы различных размеров. ...На базе палеомагнитных исследований и определений абсолютного возраста базальтов в описываемом районе выделено... три основные генерации базальтов: плиоценовые, плейстоценовые и голоценовые» (Ассоциации вулканогенных пород ..., 1973, с. 8, 23-24).

Масштабные проявления позднекайнозойских вулканических процессов присутствуют также

вблизи юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны, выделяемые в Южно-Байкальскую вулканическую область. Очаг одного из наиболее крупных вулканических ареалов базальтоидного магматизма Южно-Байкальской вулканической области присутствует в Прихубсугулье, в Дархатской котловине, относимой к крупнейшей рифтогенной структуре в Центральной Азии – Байкальской рифтовой зоне (Цыпукова и др., 2013).

Долинные плейстоценовые базальты Дархатской котловины развиты главным образом на севере и северо-западе, северо-востоке котловины. С излиянием этих базальтов связывается образование древнего Дархатского озера, спущенного впоследствии (Цыпукова и др., 2013).

С рифтовой зоной в котловине связаны холодные азотные термы с высоким дебитом до 5-25 л/сек, специфическим компонентом и температурой 4-20°C (Монгольская Народная Республика, 1990). Минеральные источники являются поставщиком азота для почв, улучшая их плодородие. Совместное присутствие азотных терм и фосфоритов, вероятно, способствует усвоению фосфорных соединений растениями.

*Рельеф* котловины, согласно литературным источникам (Нямхуу Мянганбуу, 2012) и авторским дистанционным наблюдениям, преимущественно равнинный, с элементами мелкосопочника. Главным рельефообразующим процессом является континентальный рифтогенез. Основные направления тектонических разломов – северо-восточное, северо-западное, субмеридиональное, субширотное. Рифтогенный прогиб, связанные с ним процессы вулканизма, способствовали появлению Дархатского озера и последующему его спуску. Для котловины характерно наличие большого количества сточных и бессточных озер. На высокогорных участках обрамляющих котловину хребтов присутствуют ледниковые формы рельефа – кары, трогги, приуроченные к ним озера. В подгорную часть по долинам рек спускаются морены.

Основные типы рельефа, согласно Мянганбуу (Нямхуу Мянганбуу, 2012): ледниковый, озерный, аллювиальный, криогенный, эоловый, антропогенный.

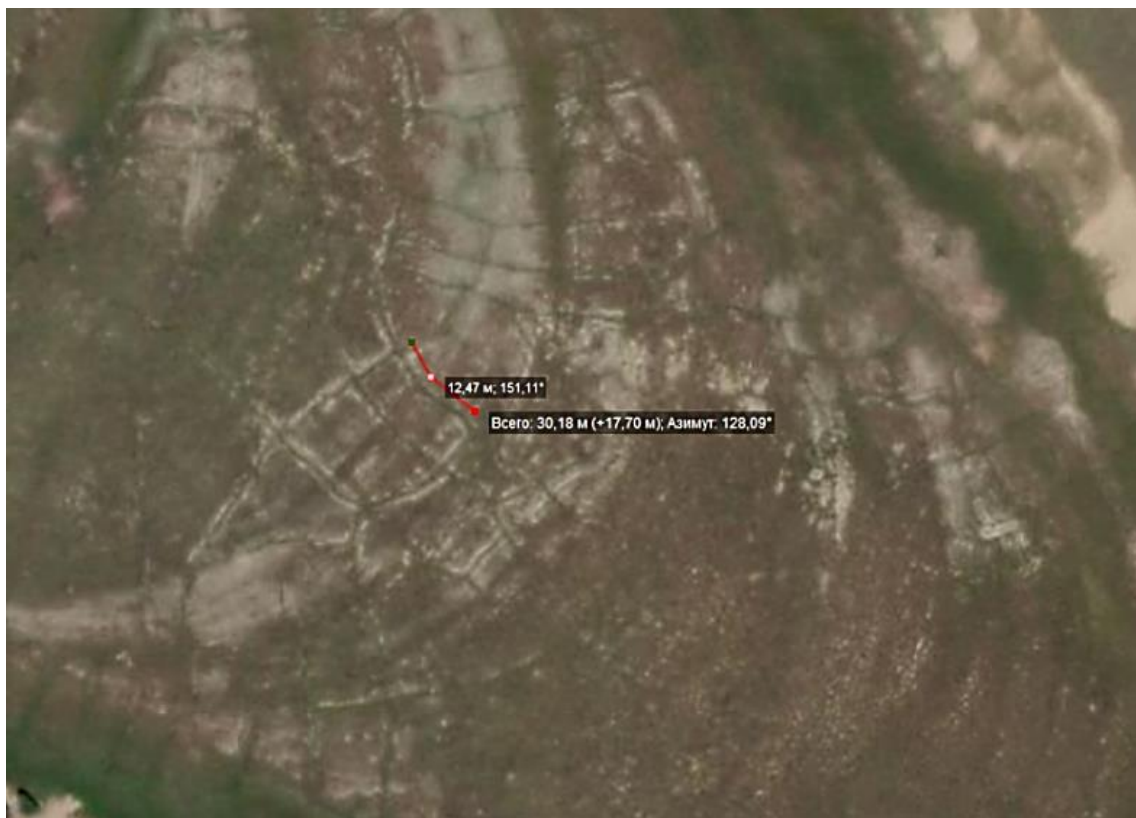
В озерной равнине Дархатской котловины присутствует две аккумулятивные террасы. Нижняя терраса сложена желтыми ленточными супесями, верхняя – слоистыми песками с горизонтами растительного детрита со значительным количеством пыльцы реликтовых растений (тсуги, широколиственных; Нямхуу Мянганбуу, 2012).

Аллювиальный рельеф представлен долинами крупных рек – Шишхид-Гол, Хугэйн-Гол, Ждаргалант-Гол, Шаргын-Гол, Джарай-Гол. Долины рек подчинены разломной тектонике. На горных склонах при выходе в котловину реки образуют концевые разливы. На отдельных участках наблюдаются сбросы, смещения русел, кулисообразное их строение, что может свидетельствовать о молодых подвижках земной коры. Дархатская котловина расположена в зоне развития многолетнемерзлых пород. В ее центральной части присутствуют многолетние бугры пучения. Глубина сезонного протаивания поверхности составляет от 1.0 до 2.5-4.5 м (Монгольская Народная Республика, 1990). Элементы эолового рельефа представлены песчаными массивами, одиночными барханами. Распознаваемые на космических снимках многочисленные залежи – следы земледельческих практик прошедших эпох – являются элементами антропогенного рельефа. Отдельные участки древних агроландшафтов были использованы в индустриальную эпоху XX века. В настоящее время древние агро- и степные ландшафты используются как пастбища.

*Дистанционные исследования территории.* Согласно дистанционным исследованиям, обширные пространства котловины представляют собой сельскохозяйственные ландшафты (древние залежи), приуроченные к днищу котловины, речным долинам, делювиально-пролювиальным склонам, концевым разливам рек (рис. 3-4). В юго-западной части котловины, южнее русла р. Хугэйн-Гол распознаются непрерывные земледельческие угодья протяженностью более 15 км. Земельные наделы в округе н.п. Рэнчинлхумбэ распознаются на протяжении более 10 км. Северная их часть дешифрируется у разветвленных песчаных массивов в междуречье Джаргалант и Арсайн-Гол. Обширные следы древних агроландшафтов присутствуют на бортах самых крупных озер котловины – Дод-Нур, Тарган-Нур, по правому берегу р. Шишхид-Гол. Земельные наделы распознаются также в долине р. Бахтахын Гол.

Размеры участков преимущественно не большие (длина и ширина – первые десятки метров). Но совокупные площади древних агроландшафтов имеют весьма и весьма значительные размеры. Согласно рисунку земельных наделов, здесь присутствуют следы земледельческих практик

нескольких исторических периодов. Очертания земельных наделов в окрестностях н.п. Рэнчинлхумбэ (рис. 5), не имеющие геометрической направленности, соответствуют таковым в долине р. Тес-Хем с её притоками (р. Цэцэрлиг, Цэцэрлэг в переводе с монгольского – «сад», Северо-Западная Монголия), высокогорным оазисам Западной Монголии (Прудникова, 2023а; Prudnikova, 2022), наделам в окрестностях вулкана Хорго Центральной Монголии и условно относятся к раннему средневековью (Прудникова, 2020).

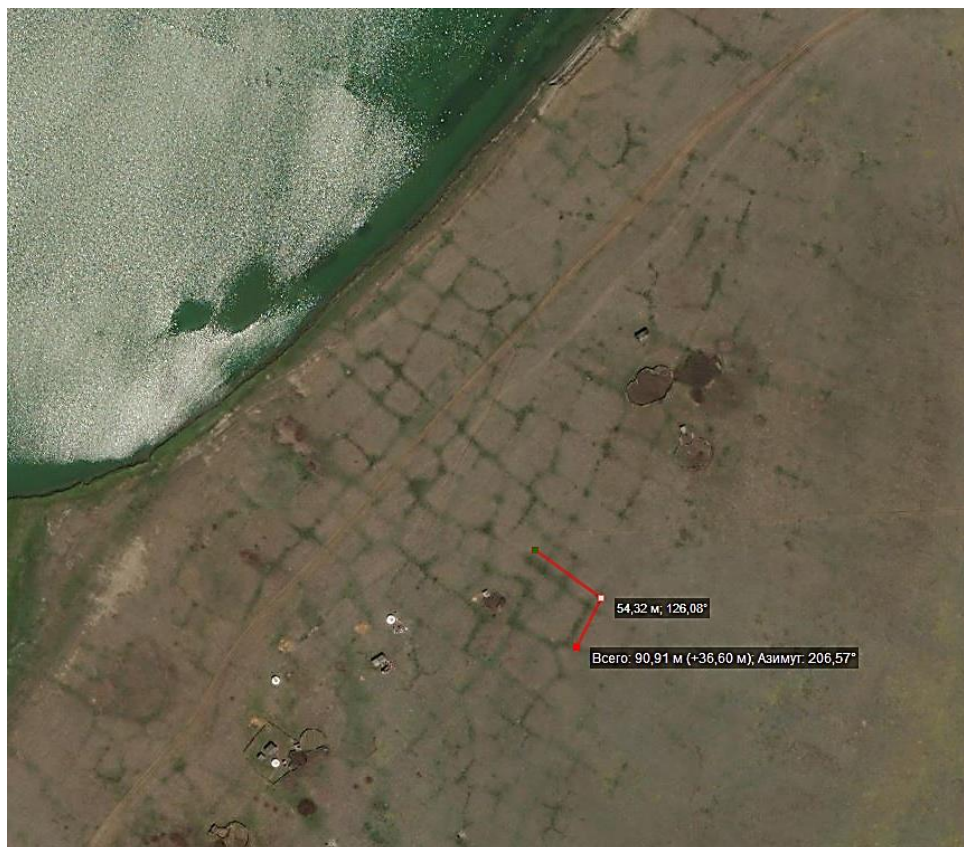


**Рис. 3.** Очертания земельных наделов в долине р. Бахтахын Гол, истоки р. Шишгид Гол, южная часть Дархадской котловины (географические координаты – 50° 54' 00.61" с.ш., 99° 23' 29.83" в.д., абс. отм. – 1564 м н.у.м. БС).

Земельные наделы, сохранившие геометрическую направленность (подпрямоугольную форму, рис. 4), согласно авторским представлениям, являются более поздними сельскохозяйственными ландшафтами.

Согласно дешифрированию космических снимков, территория Дархатской котловины была в прошлом областью широко развитого земледелия.

В почвенно-географическом районировании Монголии почвы Дархатской котловины отнесены к горно-таежной зоне с гумидным типом вертикальной зональности (Белозерцева, Кузьмин, 2006). На территории котловины присутствует широкий диапазон почв – от мерзло-таежных до каштановых. Здесь присутствуют почвы, весьма пригодные для земледелия. В центральной части котловины – черноземы, каштановые и темно-каштановые почвы. На положительных формах южных склонов мелкосопочников – горные бескарбонатные черноземы, горные лесные темноцветные, горные дерново-таежные почвы. В северной части котловины – маломощные щебнистые черноземы. В долинах рек присутствуют аллювиально-луговые почвы, каштановые песчаные, темно-каштановые, лугово-каштановые почвы. В озерно-болотных комплексах котловины выделяются торфянистые горизонты. Содержание гумуса в черноземах – от 7.1 до 10.1%, каштановых почвах – 3.4%, лугово-каштановых – 11.2%, лугово-болотных – 9.1% (Белозерцева, Кузьмин, 2006). Кислые почвы, торфяники должны способствовать усвоению растениями фосфоритов.



**Рис. 4.** Следы земельных наделов на северо-восточной оконечности оз. Тарган-Нур (географические координаты –  $51^{\circ} 28' 14.66''$  с.ш.,  $99^{\circ} 31' 55.52''$  в.д., абс. отметка – 1544 м н.у.м. БС).

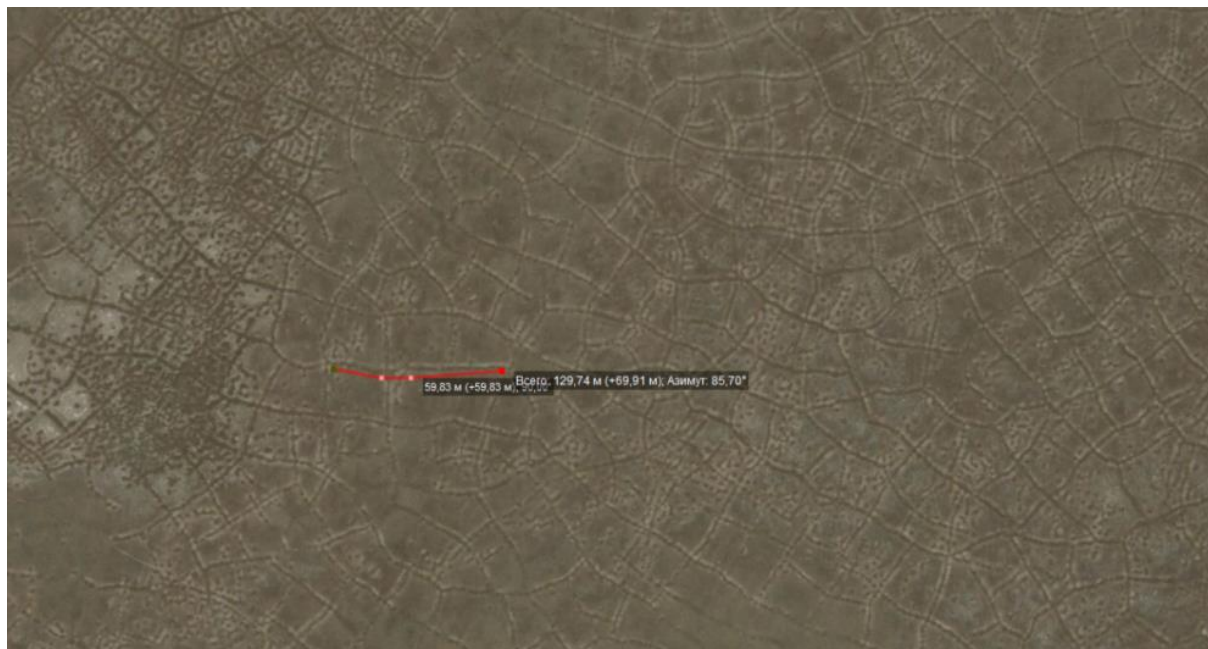
Отдельные участки древних агроландшафтов, согласно дешифрированию, были распаханы в индустриальный период. Помимо обычных почвенных ресурсов (черноземов, каштановых почв), можно предположить использование древними земледельцами насыщенных растительными остатками отложений озерных террас.

Казалось бы, территория котловины с многолетней мерзлотой не является благоприятной для присутствия земледелия в прошлом. Но глубина сезонного протаивания ее отложений, достигающая величин от 1-1.5 до 3-4.5 м (Монгольская Народная Республика, 1990), и плодородные почвы могли вполне устранить этот недостаток.

К тому же в истории известен временной период средневековья, сопоставимый с эпохой климатического оптимума голоцена – VIII-XIV в.в. – малый средневековый климатический оптимум голоцена (Фёдоров, Гребенников, 2020). Может быть, эта эпоха потепления способствовала развитию земледелия на территории Северной Монголии? Раннее средневековье – время широкого развития земледелия в Центральной Азии (Гумилев, 1967; Кызласов, 1981; Прудникова, 2020). Предполагаемые причины потепления и последующего развития земледелия на всем евразийском континенте в этот период разнообразные – от усиления солнечной активности и теплого течения Гольфстрим до уменьшения вулканических выбросов в атмосферу. Возможно, на территории Северной Монголии развитию земледелия способствовали помимо потепления военно-политические события в обществе – распространение согдийских колоний на территории Центральной Азии (Исамитдинов, 2019), становление уйгурского каганата, восстание и поражение согдийского полководца Ань Лушаня в раннесредневековом Китае (Гумилев, 1967; Кляшторный, 1987), большое количество пленных, которых могли использовать победители-уйгуры на сельскохозяйственных работах, последующее усиление древних кыргзов – известных земледельцев, а также развитие киданьской империи (Прудникова, 2020).

Вернемся к весьма обширным полигонам в окрестностях н.п. Рэнчинлхумбэ, распознаваемым, как земельные наделы (рис. 5). Полигоны сопоставимы с земельными участками в долине р. Тес-Хем

и ее притоках в Убсунурской котловине Северо-Западной Монголии. Масштабы древнего земледелия по всей долине реки от истоков до устья весьма внушительны. Находки земледельческих поселенческих объектов предполагают отнесение обширных следов земледелия в долине к раннему средневековью, ко времени господства уйгурского каганата (Prudnikova, 2022).



**Рис. 5.** Очертания обширных земельных наделов в окрестностях н.п. Рэнчинлхумбэ, центральная часть Дархатской котловины (географические координаты – 51° 06' 35.24" с.ш., 99° 38' 09.47" в.д., абс. отметка – 1567 м н.у.м. БС).

Древним насельникам Дархатской котловины очень повезло. Не везде имеют место быть месторождения и многочисленные проявления фосфоритов, так необходимых для выращивания растений. При проведении геолого-поисковых работ в котловине было пройдено 7 разрезов верхне-рифейско-кембрийских фосфоритоносных отложений. В 6 из них присутствуют фосфориты. От н.п. Рэнчинлхумбэ в северо восточном направлении был пройден поисковый геологический разрез № 5, вскрывший фосфоритовые залежи.

Согласно схеме на странице 21-29 в работе А.В. Ильина (1973), разрез № 5 пересекает область выходов источников Цагаан булаг, которые являются одними из истоков р. Жаргалант, впадающей в р. Шишгид-Гол. На правом борту реки распознаются на космоснимках обширные земельные наделы. Восточнее н.п. Рэнчинлхумбэ распознанные агроландшафты обозначены как «тария», т.е. «пашня, зерно» (рис. 6), что подтверждает правильность нашего дешифрирования. Южнее устья р. Жаргалант находится настоящий сказочный мир – Сантын босго. В переводе с монгольского это и озеро, полное счастья, и богатая река, и вход в сокровищницу, и совершенно потрясающие следы земледельческих практик.

Говоря о топонимике, присутствию счастливых моментов в названиях природных объектов Дархатской котловины, важно вспомнить Счастливую Аравию (лат. «Arabia Felix»). Счастливая Аравия – название, данное античными географами юго-западной части Аравийского полуострова (территория современной Йеменской Аравийской Республики и частично Народной Демократической Республики Йемен), славившейся плодородием и природными богатствами, особенно благовониями и золотом (Советская историческая энциклопедия, 2024).

Как правило, названия природных объектов не случайны. Счастливая Аравия не канула в веках и тысячелетиях, сведения о ее прошлом плодородии сохранились до наших времен. Вероятно, по этой же причине ряд географических объектов Дархатской котловины в силу своего особенного плодородия носил и носит до настоящего времени топоним Жаргалант (рус. «счастье, счастливый, счастливая»).



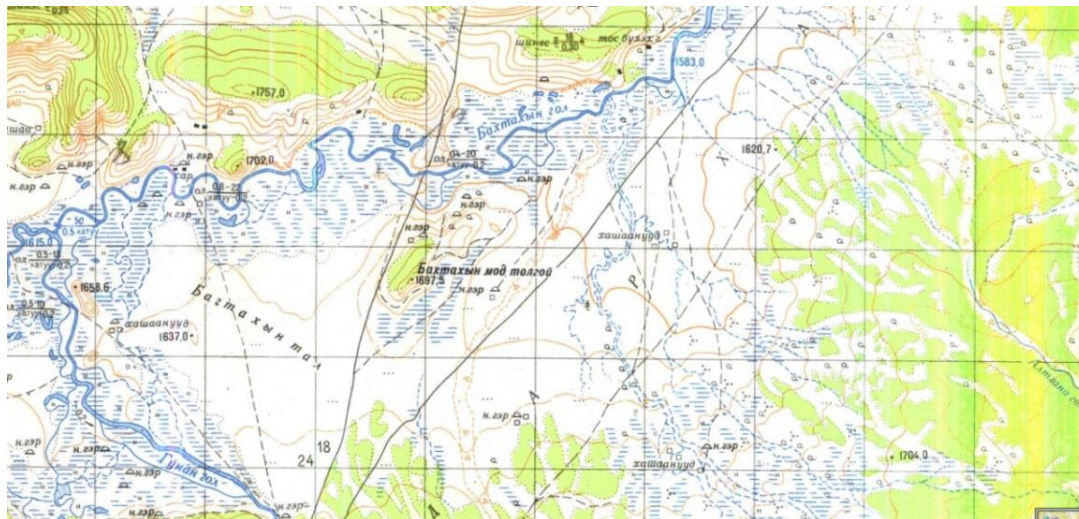


Рис. 7. Топографическая карта М 1 : 100000 окрестностей р. Бахтыхын гол.



Рис. 8. Очертания земельных наделов на западном побережье оз. Дод-Нур.

В восточной части котловины в междуречье рр. Ходон-Гол (приток р. Шаргын Гол) и Арсайн Гол присутствует Маратуинуланское проявление фосфоритов № 11 (Ильин, 1973). Здесь также распознаются многочисленные очертания земельных наделов.

В 1973 году в Дархатской котловине были проведены научно-исследовательские работы, по изучению геокриологических условий Монгольской Народной Республики. При этих исследованиях территория котловины не рассматривалась с земледельческих позиций и тем более с позиций древнего земледелия. Поэтому присутствие многочисленных полигонов трещин, распознаваемых нами как земельные наделы (линейные контуры полигонов; Геокриологические условия ..., 1974), объяснялось как морозобойное следствие. Геокриологические элементы ландшафтов присутствуют в котловине, но, на наш взгляд, причиной их возникновения могло послужить помимо естественных процессов присутствие обводненных участков оросительных каналов, увлажненных элементов земледельческого ландшафта. Промерзание именно влажных почв и грунта приводит, согласно геокриологическим исследованиям 1973 г., к образованию морозобойных трещин.

Как было сказано ранее, земледелие Дархатской котловины успешно развивалось в раннем

средневековье, относимом к эпохе потепления. После средневекового климатического оптимума наступает малый ледниковый период, продолжавшийся с XV по XIX вв. Возможно, в этот период похолодания происходило усиление формирования криогенного рельефа (морозных полигонов) в котловине (Геокриологические условия ..., 1974) по уже готовым «заготовкам», представленным очертаниями земельных наделов, руслам оросительных систем.

Дархатская котловина вполне пригодна для земледелия и в настоящее время. На схеме производственных типов сельскохозяйственных предприятий в Национальном атласе Монголии здесь отмечены 2 объекта – Рэнчинлхумбэ и Улаан Уул – области древнего земледелия. Глубина сезонного протаивания почв в котловине – от 1-1.5 до 2.5-4.5 м, что вполне удовлетворяет условиям выращивания ранних культур (Монгольская Народная Республика, 1990). На космоснимках обширные земельные наделы индустриального периода отчетливо распознаются на многих участках котловины.

Помимо присутствия фосфоритов, удобряющих почвы, есть еще одна причина земледелия в Дархатской котловине – тепловая аномалия Байкальской рифтовой зоны. Согласно исследованиям Института геохимии имени А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск), Иркутского национального исследовательского технического университета, Института земной коры СО РАН (Иркутск), «Байкальская рифтовая зона создает крупнейшую региональную тепловую аномалию, энергетический потенциал которой участвует в формировании высоких приразломных теплотоков и запасов подземных геотермальных резервуаров. Их потенциал на освоенных термальных объектах и перспективных площадях контролируется структурами пересечения крупных региональных сейсмо- и термоактивных разломов с сопутствующими поперечными сбросами, а также пространственной ассоциацией с приразломными региональными аномалиями поверхностного уходящего ИК излучения протяженностью до сотни километров и более...» (Вилор и др., 2019).

Можно предположить, что помимо тепловой аномалии немалую роль в развитии земледелия сыграла и средневековая магматическая активизация на юге Сибири (Аржанников и др., 2017). Это – присутствие и плодородного вулканического пепла, и повышенного теплового потока, благоприятные для роста растений.

Мы располагаем большим количеством примеров присутствия весьма значительных следов земледелия в пределах современных вулканов Монголии, а также приуроченных к зонам активных тектонических разломов (зоны растяжений), зонам землетрясений, являющихся в целом элементами Южно-Байкальской рифтовой зоны или оперяющими ее структурами. В районе вулкана Хорго Центральной Монголии, на южных и северных склонах хребта Булнай, в верховье долины р. Тес-Хем (Тес-Хемский ареал базальтоидного магматизма), эпицентре землетрясения планетарного значения 1905 г. на абсолютных отметках до 1900 и более м н.у.м. БС дешифрируются весьма значительные следы земельных угодий (Прудникова, 2020, 2023а, 2023б; Prudnikova, 2022).

Согласно А.Г. Еманову с соавторами (2007, с. 116-125), «для Байкальской рифтовой зоны эпицентры землетрясений концентрируются внутри впадин. Механизм формирования растягивающих напряжений внутри рифтовых впадин определяется во многом состоянием мантийного вещества под рифтовыми зонами... В Дархатской впадине эпицентры проходят цепью через ее центральную часть. Источником сейсмического процесса здесь является рифтогенез».

Вероятно, большое количество бугров пучения и термокарстовых воронок в центральной части котловины, приуроченных к пересечению субширотной системы разломов с молодыми разломами северо-восточного простирания, может свидетельствовать о присутствии повышенного теплового потока, привносе по зонам разломов вод, способствующих нарастанию ледяного ядра. Отдельные термокарстовые воронки весьма схожи с маарами, геоморфологическими формами, образовавшимися в результате прорыва на поверхность водяных паров, что могло бы свидетельствовать о присутствии гидротерм.

### Выводы

Дистанционные наблюдения аридных регионов Центральной Азии, а также полевые ландшафтные исследования доказали присутствие широко развитого древнего земледелия на традиционно-скотоводческих современных территориях. Присутствие земледелия в Дархатской котловине, характеризующейся достаточно суровыми климатическими условиями, можно связать со

средневековым периодом потепления (малый климатический оптимум). Почвенные ресурсы (каштановые, лугово-каштановые почвы, черноземы) вполне благоприятствовали развитию земледельческих практик.

Присутствие в раннем средневековье на территории Монголии и Китая согдийских колоний также должно было способствовать земледелию. Становление уйгурского каганата, его военные победы, использование военнопленных (китайцев, согдийцев и др.) на сельскохозяйственных работах, вероятно, также способствовало его развитию.

Основными природными причинами развития земледелия в Дархатской котловине является присутствие в слагающих ее горных породах месторождений многочисленных проявлений фосфоритов (основы минеральных удобрений), в какой-то мере – азотных терм, а также её приуроченность к юго-западному флангу Байкальского рифта, создающего тепловую аномалию, благоприятную для развития земледельческих практик.

Выявленные очаги развития древнего земледелия на современных скотоводческих территориях Предлагаемая версия требуют дальнейших научных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанников С.Г., Иванов А.В., Аржанникова А.В., Демонтерова Е.И., Жоливе М., Воронин В.И., Буянтуев В.А., Осколков В.А.* 2017. Возраст Жомболокского лавового поля (Восточный Саян) по дендрохронологическим и радиоуглеродным данным // Геология и геофизика. Т. 58. № 1. С. 27-47.
- Ассоциации вулканогенных пород Монгольской Народной Республики, их состав и стратиграфическое положение. Советско-Монгольская научно-исследовательская геологическая экспедиция. 1973 // Труды. Вып. 7 / Ред. И.В. Лучицкий. М.: Наука. С. 8-24.
- Белозерцева И.А., Кузьмин В.А.* 2006. Почвы Дархатской котловины // География и природные ресурсы. № 2. С. 143-151.
- Вилор Н.В., Шкиря М.С., Терешкин С.А., Давыденко Ю.А., Вилор М.А.* 2019. Изучение новейшей структуры в активных разломах БРЗ для поисков геотермальных ресурсов // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы. Материалы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева, г. Иркутск, 14-15 октября. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, Иркутский государственный университет, Китайско-Российский исследовательский центр Удаляньчи-Байкал по новейшему вулканизму и окружающей среде. С. 44.
- Гениафт Ю.С., Салтыковский А.Я.* 2000. Кайнозойский вулканизм Монголии // Российский журнал наук о Земле. Т. 2. № 2 [Электронный ресурс <https://rjes.wdcb.ru/rus/v02/rje00038/rje00038.htm> (дата обращения 15.05.2023)].
- Геологическая библиотека GeoKniga. 2024 [Электронный ресурс <https://www.geokniga.org> (дата обращения 10.10.2023)].
- Геокриологические условия Монгольской Народной Республики. 1974. Совместная Советско-Монгольская научно-исследовательская геологическая экспедиция // Труды. Вып. 10. М.: Наука. 191 с.
- Гумилев Л.Н.* 1967. Древние тюрки. М.: Наука. 504 с.
- Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Фатеев А.В., Ярыгина М.А.* 2007. Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. Обнинск: ГС РАН. 404 с.
- Ильин А.В.* 1973. Хубсугульский фосфоритоносный бассейн. Совместная советско-монгольская научно-исследовательская геологическая экспедиция // Труды. Вып. 6. М.: Наука. 167 с.
- Исамитдинов Ж.Б.* 2019. Согдийцы – колонизаторы на трассе Великого Шелкового Пути. С. 19-25 [Электронный ресурс <https://cyberleninka.ru/article/n/sogdiytsy-kolonizatory-na-trasse-velikogo-shyolkovogo-puti/viewer> (дата обращения 15.05.2023)].
- Кляшторный С.Г.* 1987. Надпись уйгурского Бёгю-кагана в Северо-Западной Монголии // Центральная Азия: новые памятники письменности и искусства. М.: Наука. С. 19-37.
- Кызласов Л.Р.* 1981. Культура древних уйгур (VIII-IX вв.) // Степи Евразии в эпоху Средневековья. Серия: Археология СССР. М. С. 52-54.
- Монгольская Народная Республика. Национальный атлас. 1990. Улан-Батор; М.: АН МНР; АН СССР. 144 с.
- Нямхуу Мянганбуу.* 2012. Рельеф Дархатской котловины // Вестник Томского государственного университета. № 356. С. 179-182
- Прудникова Т.Н.* 2020. Древнее земледелие и трансформация ландшафтов Центральной Азии. С.-Пб.: Сциентиа. 196 с.
- Прудникова Т.Н.* 2023а. Высокогорные оазисы Западной Монголии. 17-ый выпуск научных статей «Записки Усть-Каменогорского филиала КГО» // Современные проблемы географии и научные школы Казахстана. Материалы Международной научно-практической конференции, 16-17 марта 2023 г. / Ред. А.В. Егорина.

Усть-Каменогорск: ТОО «ВКПК АРГО». С. 114-118.

*Прудникова Т.Н.* 2023б. Особенности земледелия Северо-Западной Монголии // Современная Евразия: общественно-географический анализ. Материалы Международной научной конференции «XIV научная Ассамблея АРГО», г. Улан-Удэ, 10-19 сентября 2023 г. / Ред. А.Г. Дружинин, В.С. Батомункуев. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН. С. 174-176.

Советская историческая энциклопедия. 2024 [Электронный ресурс <https://dic.academic.ru/dic.nsf/sie/17073/СЧАСТЛИВАЯ> (дата обращения 15.04.2023)].

*Фёдоров В.И., Гребенников П.Б.* 2020. Малый (Средневековый) климатический оптимум голоцена и его возможные причины // Взаимодействие геосфер. Т. 42. № 4. С. 395-405.

*Цытукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Канакин С.В., Одгэрэл Д.* 2013. Неогеновый щелочно-базальтовый вулканизм Дархатской впадины (Северная Монголия): новые геолого-геохимические данные // Материалы Второго всероссийского симпозиума с международным участием и молодежной научной школы «Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы». Иркутск. Т. 2. С. 159-163.

*Prudnikova T.N.* 2022. The Properties of Agriculture-Related Objects in Arid Regions in Northwest Mongolia and the Tuva Border Areas // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 4. P. 462-472. [*Прудникова Т.Н.* 2022. Особенности земледельческих объектов аридных территорий Северо-западной Монголии и приграничных территорий Тувы // Аридные экосистемы. Т. 28. № 4 (93). С. 140-152.]

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ЗДОРОВЬЯ АРИДНЫХ ПОЧВ ЮГА РОССИИ  
ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ**

© 2024 г. Т.В. Минникова, С.И. Колесников, А.В. Кутасова, Н.С. Минин, В.Г. Гайворонский

*Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского*

*Южного федерального университета*

*Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 194/1. E-mail: loko261008@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.04.2024. После доработки 01.06.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Под влиянием загрязнения нефтяными углеводородами почвы из разных природных зон имеют разные физико-химические и биологические показатели состояния. Наиболее чувствительными при загрязнении и изменении экологического состояния являются биологические показатели. Ввиду условий почвообразования, физических и биологических свойств почвы аридной зоны по сравнению с другими типами почв очень неустойчивы к загрязнению нефтяными углеводородами. В связи с этим актуально нормировать содержание нефтяных углеводородов с учетом отклика активности ферментов и микробиологических показателей, оценки фитотоксичности почвы. Такие нормативы служат параметрами здоровья почв в регионе при загрязнении нефтью и нефтепродуктами. Цель исследования – оценить экологические стандарты здоровья аридных почв Юга России при загрязнении нефтью и нефтепродуктами. Установлено, что с ростом концентрации нефти и нефтепродуктов происходит угнетение биологических показателей почв. Экологический норматив для нефти в бурой полупустынной почве (англ. «Eutric Cambisols (Loamic, Protocalcic)», 0.1%) наименьший по сравнению с солончаком (англ. «Haplic Solonchaks Aridic», 1.0%) и каштановой почвой (англ. «Haplic Kastanozems Chromic», 0.2%). Допустимое содержание мазута в каштановой почве (0.4%) меньше, чем в солончаке (1.0%) и бурой полупустынной почве (0.5%). Содержание дизельного топлива в каштановой и бурой полупустынной почвах одинаковое (0.2%), а в солончаке – выше в 3 раза (0.6%). Максимальная разница в нормативах среди изученных типов почв установлена для нефти: между солончаком и каштановой и бурой полупустынной почвами она составляет 5 и 10 раз. Каштановая и бурая полупустынная почва более чувствительны к загрязнению нефтью, чем солончак. Среди биологических показателей наибольшей чувствительностью к загрязнению нефтью и нефтепродуктами обладает обилие бактерий рода *Azotobacter* и общая численность бактерий, а наименьшей – активность каталазы, дегидрогеназ и длина корней. Наибольшей информативностью при загрязнении аридных почв нефтью и нефтепродуктами обладает активность каталазы и дегидрогеназ и длина корней, а наименьшей – общая численность бактерий и активность уреазы. Наиболее устойчивой почвой к загрязнению нефтяными углеводородами является солончак, а наименее – бурая полупустынная (нефть и дизельное топливо) и каштановая (мазут и бензин) почвы. Результаты данного исследования возможно использовать при разработке экологических стандартов здоровья аридных почв при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.

*Ключевые слова:* почва, экологическое состояние, нормативы, нефть, мазут, дизельное топливо, бензин, биоиндикация.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-126-144**

**EDN: JCNQGZ**

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами поверхностных вод, прибрежных территорий в результате нефтепромыслов, территории степей и лесов в результате транспортировки нефти и нефтепродуктов, аварийных ситуаций приводит к серьезным последствиям для экосистемы (Вобликов и др., 2011; Исмаилов, Алиева, 2019; Исмаилов и др., 2020; Колесников и др., 2011, 2013; Маркелов и др., 2018; Никитаева, Бубликова, 2015; Островский и др., 2019; Stepanova et al., 2022). Самое серьезное последствие для экосистемы – это изменение физических характеристик почвы, что оказывает токсическое воздействие ее на биологические свойства (Рогозина, Шиманский 2007).

Повышение гидрофобности почвы приводит к повышению ее влажности и плотности, что, в свою очередь, ведет к снижению доступа кислорода в почвенную толщу: денитрификация, сульфатредукция, метаногенез. Кроме того, в водах, сопутствующих нефти, содержится много натрия, влияющего на почвенный поглощающий комплекс и кислотность почвы, что выражено в заметном возрастании значения pH (Шаркова, 2011). Привнос углеродов с нефтью в почву нарушает оптимальное соотношение между углеродом и азотом в более чем 40 раз (C:N – 400:1), при нормальном соотношении C:N – 10:1. Как следствие, происходит изменение активности почвенной биоты и ингибирование ферментативной активности почвы, снижение доступа элементов питания для растений и прочие последствия, пагубно влияющие на экологическое состояние почвы.

Территория Юга России имеет высокое разнообразие типов и подтипов почв в зависимости от типа климата. На территории аридной зоны Юга европейской части России наиболее распространены каштановые почвы и бурые полупустынные почвы, а солончаки занимают значительно меньшую площадь (Конюшкова, Абатуров, 2016; Новикова и др., 2010; Панкова и др., 2014). Каштановые почвы России занимают 107 млн. гектар, или 4.8% от общей площади страны. На юге наибольшие площади распространения этих типов почв – в Республике Калмыкия и Республике Дагестан, а также в Астраханской области (Национальный атлас ..., 2011). Бурые полупустынные почвы являются зональным типом пустынных почв. Они расположены вместе с лугово-бурыми почвами в Евразии и Северной Америке, где занимают 146.8 млн. га (Национальный атлас ..., 2011). Солончаки занимают 120 млн. га, или 5.4% территории. Солончаками называют почвы с повышенным содержанием легкорастворимых солей в составе от 1-3 до 10-15% (иногда до 25%). Чаще всего солончаки образуются в пустынях (Национальный атлас ..., 2011). Сеть автомобильных дорог и учащенное автомобильное движение на Юге России приводят к загрязнению почв бензином и свинцом (Бейсеев, Бидайык, 2020; Леонидова и др., 2019; Ляшенко, Калиниченко, 2012). Естественное самоочищение почв от нефти и нефтепродуктов затрудняется эколого-геохимическими особенностями типов почв и составом нефтяных углеводородов (Исмаилов, Гасымова, 2016; Геннадиев и др., 2015а, б).

Диагностика состояния нефтезагрязненных почв с помощью биологических показателей имеет высокую воспроизводимость и легкость выполнения (Бананова, Лазарева, 2014; Булуктаев, 2020; Ковалева и др., 2018; Revina et al., 2024). Оценка загрязнения солончака тяжелыми металлами и нефтью позволила установить высокую чувствительность активности целлюлазы, каталазы и дегидрогеназ, а также целесообразность использования в целях мониторинга, диагностики, индикации и нормирования химического загрязнения солончаков (Колесников и др., 2011). Загрязнение темно-каштановой и каштановой почв нефтью и нефтепродуктами позволило установить их большую устойчивость к загрязнению нефтью по сравнению с солончаком и бурой полупустынной почвой (Колесников и др., 2013). Внесение биочара и «Байкал ЭМ-1» снижает остаточное содержание нефти в бурой полупустынной почве, а гумат натрия вызывает стимуляцию активности каталазы, длины побегов, корней, а также всхожести редиса. С целью восстановления состояния нефтезагрязненных почв используют широкий диапазон методов биоремедиации почв (Sales da Silva et al., 2020; Stepanova et al., 2022; Sui et al., 2021). Проведена оценка экологического состояния бурой полупустынной почвы при нефтяном загрязнении после ремедиации биочаром, гуматом натрия, нитроаммофосом, «Байкал ЭМ-1» (Минникова и др., 2023).

Нормирование загрязнения почв нефтяными углеводородами предпринимается за последние годы многими исследователями (Быкова, 2019; Ковалева, Яковлев, 2016, 2018; Русаков и др., 2017; Пиковский и др., 2003; Хаустов, Редина, 2017), однако отдельных нормативов предельно допустимого содержания для разных типов почв получено немного (Гайворонский и др., 2023; Околелова и др., 2015; Шагидуллин и др., 2011; Kolesnikov et al., 2022). При разработке нормативов допустимого содержания нефти и нефтепродуктов возникает такое затруднение, как нецелесообразность использования единой предельно допустимой концентрации нефти для всех почв России (Михайлова и др., 2016, 2018). На процесс разложения нефти оказывает влияние региональные эколого-генетические параметры почвы и эколого-географические особенности региона (Быкова, 2019; Дауд и др., 2019; Геннадиев и др., 2015а, б; Ковалева и др., 2018; Колесников и др., 2007; Михедова и др., 2023; Шагидуллин и др., 2011). Поэтому необходима разработка нормативов содержания нефти и нефтепродуктов для каждой природной зоны России.

Р.М. Дауд с соавторами (2019) на основе нарушения их экосистемных функций разработал региональные нормативы допустимого содержания нефти в аридных почвах Юга России: в темно-каштановой почве это 0.40% нефти, в каштановой и светло-каштановой почвах – 0.30%, в бурой полупустынной – 0.24%, в песчаной бурой полупустынной – 0.20%. При загрязнении мазутом чернозема обыкновенного, каштановой, светло- и темно-каштановой, бурой полупустынной и песчаной бурой полупустынной почв были предложены региональные нормативы содержания в почвах: от 0.20 до 0.32% (Колесников и др., 2019). Однако следует учитывать, что нефть, мазут, бензин, дизельное топливо значительно различаются по своему составу и токсическому воздействию на биоту почвы (Бабаев и др., 2020; Давыдова, Тагасов, 2004; Маслобоев, Евдокимова, 2012; Мужехоев и др., 2022; Ruseva et al., 2024).

Цель нашей работы – получить экологические стандарты здоровья аридных почв Юга России при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.

### Объекты и методы

*Объекты исследования.* Были проанализированы три типа почв: солончак типичный, бурая полупустынная и каштановая почвы (табл. 1, рис. 1). Почвы отбирали из пахотного горизонта ( $A_{\text{пах}}$  0–20 см). Бурая полупустынная почва (англ. «Eutric Cambisols (Loamic, Protocalcic)») была отобрана в п. Хулхута Яшкульского района, Республика Калмыкия. Каштановая почва (англ. «Haplic Kastanozems Chromic») была отобрана в п. Привольный Ремонтненского района Ростовской области. Солончак типичный (англ. «Haplic Solonchaks Aridic») был отобран в п. Утта Яшкульского района, Республика Калмыкия (World Reference Base for Soil Resources, 2022).

**Таблица 1.** Характеристики мест отбора и основные физико-химические свойства почв.

№	Тип почв	World Reference Base for Soil Resources (2022)	Тип экосистемы	Гранулометрический состав, %			$C_{\text{орг}}$	pH
				Глина	Песок	Ил		
1	Солончак типичный	Haplic Solonchaks Aridic	Сухая степь с галофитной растительностью	14	72	14	1.75	7.4
2	Каштановая почва	Haplic Kastanozems Chromic	Пашня	47	37	11	0.51	8.1
3	Бурая полупустынная почва	Endosalic Calcisols Yermic	Полупустыня	15	72	13	0.30	8.0

*Загрязнители.* Для загрязнения почв в модельных условиях использовали свинец, нефть, мазут, дизельное топливо и бензин. Для моделирования загрязнения нефтяными углеводородами использовали нефть, предоставленную Новошахтинским нефтеперерабатывающим заводом (г. Новошахтинск, Неклиновский район). В модельном эксперименте использовали нефть с плотностью 0.861 кг/м<sup>3</sup>, содержанием серы 1.34%, массовой долей воды 0.27%, концентрацией хлористых солей 73 мг/дм<sup>3</sup>, массовой долей механических примесей 0.006%, массовой долей парафина 4.46%. Для модельного эксперимента использовали топочный мазут (IV вида) с плотностью 923.4 кг/м<sup>3</sup>, массовой долей серы 1.71%, зольностью 0.06%. Температура застывания – минус 15°C. Было использовано дизельное топливо марки Л (летнее; класс 2) с плотностью 831.5 кг/м<sup>3</sup>, массовой долей серы не более 0.04 мг/кг, цетановым числом 47.

В рамках модельного эксперимента в почву вносили автомобильный неэтилированный бензин «Регуляр-92» (класс 2), с плотностью 750 кг/м<sup>3</sup>, концентрацией свинца не более 5 мг/дм<sup>3</sup>, концентрацией фактических смол 2.0 мг/100 см<sup>3</sup>, массовой долей серы 0.011 мг/кг, объемной долей бензола 3.8%. Мазут, бензин и дизельное топливо были приобретены на автомобильной заправочной станции «Газпром» (г. Ростов-на-Дону).

*Модельный эксперимент.* Образцы подготовленной почвы (200 г) помещали в вегетационные сосуды. Перед загрязнением почв нефтью и нефтепродуктами почву увлажняли водой 35% от массы

почвы. В объеме жидкости учитывали вносимую нефть, мазут, дизельное топливо и бензин по объему нефтяных углеводородов.



**Рис. 1.** Карта-схема расположения точек отбора почв: 1 – солончак типичный, 2 – каштановая почва, 3 – бурая полупустынная почва.

*Методы.* Для оценки степени восстановления экологического состояния нефтезагрязненных солончака, каштановой и бурой полупустынной почв после ремедиации исследовали физические, физико-химические и биологические показатели (табл. 2).

В результате измерения биологических показателей был рассчитан интегральный показатель биологического состояния почвы или ИПБС (Kolesnikov et al., 2013, 2019). Полученные значения биологических показателей для каждого варианта и каждого типа почвы были использованы для расчета ИПБС по формуле 1 (Колесников и др., 2019):

$$B = \frac{B_{ч}}{B_{\max}} \times 100 \quad (1),$$

где  $B_{ч}$  – относительный балл показателя,  $B_{\max}$  – максимальное значение показателя (значение контроля для каждого показателя).

Для расчета ИПБС значение каждого из шести показателей в чистой почве (контроле) принимали за 100%, а значения в почве с ремедиантом выражали в процентах (формула 2):

$$\text{ИПБС} = \frac{B_{\text{ср}}}{B_{\text{ср.}\max}} \times 100 \quad (2),$$

где  $B_{\text{ср}}$  – средний оценочный балл всех показателей,  $B_{\text{ср.}\max}$  – максимальный оценочный балл всех показателей.

Для загрязненных почв за 100% использовали значения показателя в черноземе только при добавлении нефти либо нефтепродукта; значения выражали в процентах от контроля. После этого определяли среднее значение 12 показателей в загрязненной почве.

Чувствительность биологических показателей оценивали по разнице со значением биологического показателя в контроле: чем больше показатель изменялся относительно контроля (контроль = 100%), тем он более чувствителен. Различают чувствительные (<50%), чувствительные средней степени (55-75%) и малочувствительные (>0.80%) биологические показатели.

**Таблица 2.** Методы исследования физико-химических и биологических показателей почвы.

№	Наименование	Метод
<b>Физико-химические показатели</b>		
1	Содержание Органического вещества	Оценивали методом И.В. Тюрина, основанным на окислении углерода органического вещества почвы серноокислым раствором дихромата калия с фотоколориметрическим окончанием, %
2	Гранулометрический состав	Оценивали количество фракций почвы (гранулометрический состав) методом пипетки Н. А. Качинского.
3	Реакция почвенной среды (рН)	В почвенной вытяжке (вода:почва – 2.5 : 1) потенциометрическим методом
<b>Биологические показатели</b>		
4	Общая численность бактерий	Методом люминесцентной микроскопии при окрашивании раствором акридинового оранжевого, млрд /г почвы
5	Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i>	Оценивали по количеству комочков почвы, обросших колониями <i>Azotobacter Chlorococcum</i> (Shivprasad, Page, 1989)
6	Активность каталазы	Газометрическим методом по разложению перекиси водорода, мл O <sub>2</sub> /1 г/1 мин
7	Активность дегидрогеназ	По восстановлению солей тетразолия хлористого в трифенилформазаны с колориметрическим окончанием, мг ТФФ/10 г/24 ч
8	Активность инвертазы	По количеству восстанавливающих сахаров и по изменению оптических свойств сахарозы до и после воздействия фермента, мг глюкозы/1 г/24 ч
9	Активность уреазы	Колориметрическим методом по количеству аммиака с реактивом Несслера, при гидролизе карбамида, мг NH <sub>3</sub> в г почвы за 24 часа
10	Активность фосфатазы	Колориметрическим методом по изменению содержания нитрофенолов с образованием органического фосфора и минеральных субстратов, мкг п-нитрофенола в 1 грамме почвы за 1 час
11	Всхожесть	Количество проросших семян редиса ( <i>Raphanus sativus</i> L.) за 7 суток фитотоксического эксперимента, %
12	Длина побегов	Измерение длины надземных побегов редиса ( <i>R. sativus</i> L.), мм
13	Длина корней	Измерение длины корней редиса ( <i>R. sativus</i> L.), мм

Информативность биологических показателей оценивали о тесноте корреляции Пирсона между содержанием нефтяных углеводородов и биологическими показателями. В зависимости от типа почв различают наиболее информативные ( $r > 0.85$ ), менее информативные (0.50-0.80) и наименее информативные показатели ( $r < 0.50$ ).

Статистическая обработка полученных данных была проведена с использованием программного пакета Statistica 12.0 (средние значения, дисперсия) была определена, а надежность различных образцов была установлена с использованием дисперсионного анализа (англ. «Student's t-test»).

### Результаты и обсуждение

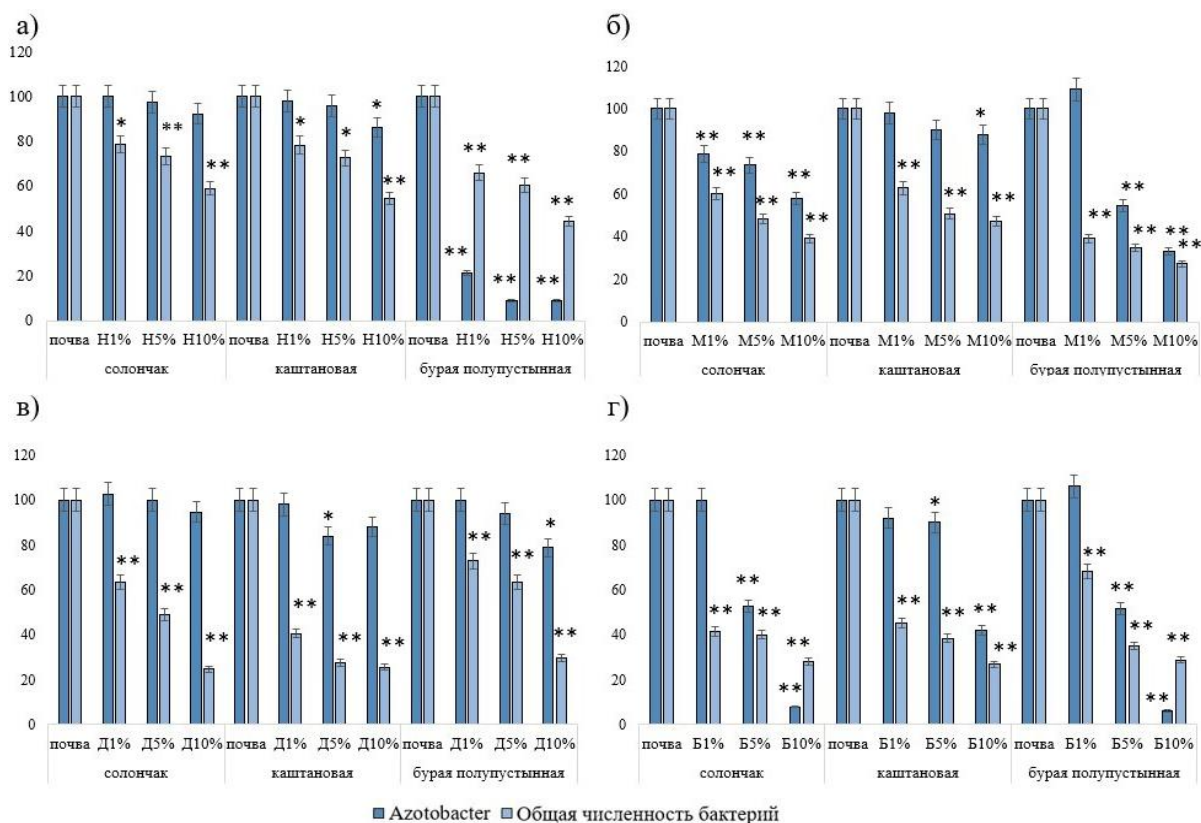
*Физико-химические показатели почв.* По своим физико-химическим свойствам почвы значительно различаются (табл. 1). Солончак типичный отличается нейтральной реакцией почвенной среды и более высоким содержанием органического вещества, чем бурая полупустынная и каштановая почвы. Однако все три типа существенно различаются по своему гранулометрическому составу, что также оказывает влияние на пути миграции тяжелых металлов и скорость естественного разложения нефтяных углеводородов (Седых и др., 2011; Степанова и др., 2016; Терехова и др., 2021). Эти почвы различаются типом экосистем, гранулометрическим составом (содержанием

песка, глины и ила), содержанием органического углерода ( $C_{орг.}$ ) и реакцией почвенной среды (рН). Наибольшее содержание  $C_{орг.}$  установлено в солончаке (1.75%), а наименьшее – в бурой полупустынной почве (0.30%).

Каштановая и бурая полупустынная почвы имеют высокий показатель щелочности (рН) – 8.1 и 8.0 соответственно. Почвы отличаются слабощелочной (солончак) и щелочной (каштановая и бурая полупустынная) реакциями среды. В солончаках такая реакция обусловлена присутствующими хлоридами и сульфатами. В каштановой и бурой полупустынной почвах сильнощелочная реакция связана с присутствием в них гидрокарбонатов натрия и кальция. Слабощелочная и сильнощелочная реакция среды типичны для аридных почв, формирующихся в условиях недостатка атмосферных осадков в регионе Юга европейской части России (Залибеков и др., 2022, 2023). Гранулометрический состав этих почв различается кардинально: для каштановой почвы характерен тяжелосуглинистый состав, а для бурой полупустынной – легкосуглинистый. Солончак и бурая полупустынная почва очень схожи по содержанию глины, песка и ила, а в каштановой почве примерно в равных частях содержится и глина, и песок, но содержание ила минимальное (11%).

Таким образом, основные физико-химические свойства почв аридной зоны определяют поведение нефтяных углеводородов в этих почвах и оказывают непосредственное воздействие на их биологические показатели и ассимиляционный потенциал (Бабаев и др., 2020; Геннадиев и др., 2015а, б).

*Микробиологические показатели.* При загрязнении нефтяными углеводородами эти показатели изменяются в зависимости от концентрации нефти и нефтепродуктов и от типа почв (рис. 2).



**Рис. 2.** Микробиологические показатели аридных почв после загрязнения нефтяными углеводородами, % от контроля: а) нефть, б) мазут, в) дизельное топливо, г) бензин. Условные обозначения: \* – статистическая достоверность отличия от контроля  $p < 0.05$ , \*\* –  $p < 0.01$ .

При загрязнении каштановой и бурой полупустынной почв с ростом концентрации нефти установлено снижение обилия бактерий рода *Azotobacter* на 14-91%. Максимальное снижение обилия бактерий *Azotobacter* установлено в бурой полупустынной почве: более чем на 90% по сравнению с контролем. Если загрязнение солончака нефтью практически не оказывало влияния на обилие

бактерий, то при загрязнении мазутом установлено его снижение на 21-42%. Обилие бактерий *Azotobacter* в каштановой почве не зависело от концентрации мазута. В бурой полупустынной почве как при загрязнении нефтью, так и при загрязнении мазутом наблюдали снижение обилия *Azotobacter* на 45 и 67% при дозах 5 и 10% мазута. Загрязнение дизельным топливом не оказывало негативного влияния на обилие *Azotobacter* в солончаке и бурой полупустынной почве. Только при 10% дозе дизельного топлива в бурой полупустынной почве установлено ингибирование обилия бактерий *Azotobacter* на 21%; в каштановой почве при 5 и 10% дизельного топлива ингибирование показателя составило 16 и 12% в сравнении с контролем. Загрязнение бензином оказывало ингибирующее воздействие на обилие *Azotobacter* в солончаке – на 47-92%, в каштановой почве – на 10-58%, в бурой полупустынной почве – на 48-94%.

Численность почвенных бактерий в солончаке при загрязнении нефтью снизилась на 21-41%, в каштановой почве – 22-45%, а в бурой полупустынной – 34-55% относительно контроля. При загрязнении солончака мазутом снижение численности составило 40-61%, при загрязнении каштановой почвы – 37-53%, бурой полупустынной – 61-73%. При загрязнении солончака дизельным топливом снижение численности почвенных бактерий составило 37-75%, каштановой почвы – 59-74%, бурой полупустынной – 27-70%. Снижение численности бактерий в солончаке при загрязнении бензином составило 58-72%, в каштановой почве – 55-73%, а в бурой полупустынной – 32-71% относительно контроля.

Таким образом, внесение бензина оказывало наибольшее токсическое воздействие на обилие бактерий рода *Azotobacter* во всех почвах, тогда как дизельное топливо и бензин ингибировали их численность. Наименьшее токсическое воздействие на обилие *Azotobacter* оказывало дизельное топливо, а на численность бактерий – нефть. При загрязнении нефтью и мазутом наиболее чувствительна бурая полупустынная почва, а при загрязнении дизельным топливом и бензином – солончак и каштановая почва.

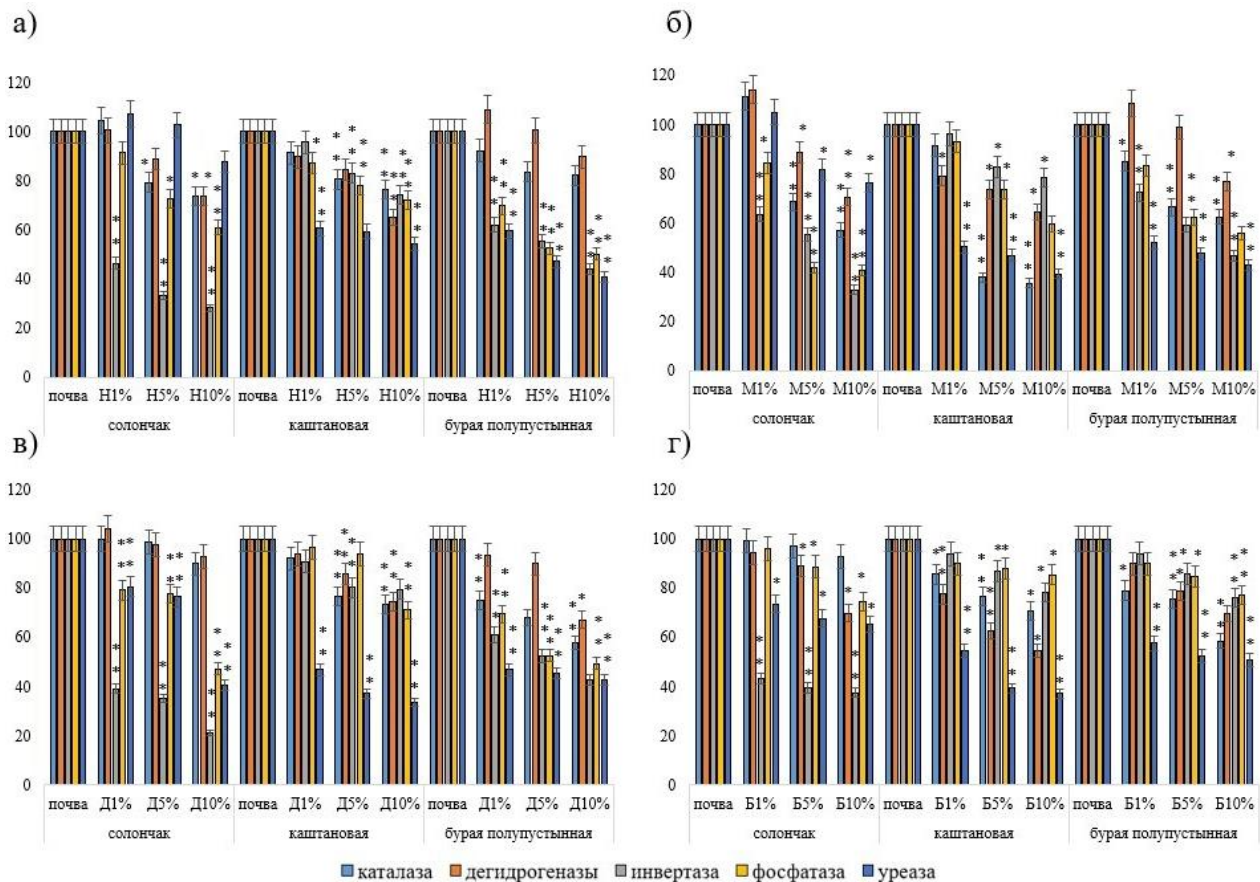
*Ферментативная активность.* Активность некоторых ферментов классов оксидоредуктазы и гидролазы представлена на рисунке 3. При загрязнении солончака нефтью с ростом дозы установлено наибольшее ингибирование активности инвертазы и фосфатазы на 54-72% и 9-39% соответственно. При этом активность снижалась только при максимальной дозе нефти – на 12%.

При загрязнении нефтью каштановой почвы все активность всех ферментов (кроме уреазы) с ростом дозы нефтяного углеводорода снижалась на 9-35%, а активность уреазы – на 39-46%. В бурой полупустынной почве установлено снижение активности гидролаз (инвертазы, уреазы и фосфатазы) на 41-59%. Активность оксидоредуктаз бурой полупустынной почвы снижалась незначительно – на 8-18% (каталаза) и на 10% (дегидрогеназы).

Активность оксидоредуктаз (каталазы и дегидрогеназ) была простимулирована на 11 и 14% при загрязнении солончака 1% мазута, но с ростом концентрации углеводорода активность ферментов снижалась на 43 и 29%. Активность инвертазы и фосфатазы с ростом концентрации мазута снижалась на 36-69% и 16-59% соответственно. Активность уреазы в солончаке была ингибирована при 5 и 10% мазута на 18 и 24% относительно контроля. Активность оксидоредуктаз каштановой почвы снижалась более значительно, чем солончака: каталаза снижалась на 9-64%, дегидрогеназы – на 21-39%. Ингибирование инвертазы и фосфатазы каштановой почвы наблюдали с концентрации 5 и 10% на 17-22% и 26-40% относительно контроля. Активность уреазы каштановой почвы была ингибирована уже с концентрации 53 и 61%. Каталаза бурой полупустынной почвы снижалась с ростом концентрации на 25-39%, а дегидрогеназ – на 23% только при 10% мазута. Гидролазы бурой полупустынной почвы были ингибированы мазутным загрязнением на 28-53% (инвертаза), 17-44% (фосфатаза) и 48-57% (уреаза).

При загрязнении дизельным топливом солончака активность каталазы и дегидрогеназ изменялась только при концентрации 10% – на 10 и 7%. Значительное ингибирование установлено по активности гидролаз: на 61-79% (инвертаза), 21-53% (фосфатаза) и 19-60% (уреаза). Активность каталазы и дегидрогеназ каштановой почвы снижалась при концентрации 5 и 10% – на 14-27% относительно контроля. При тех же концентрациях дизельного топлива активность инвертазы и фосфатазы снижалась на 20-29%. Активность уреазы каштановой почвы была ингибирована на 53% уже при 1% дизельного топлива, а при повышении его концентрации на 5 и 10% – на 63 и 67% от контроля. В бурой полупустынной почве активность каталазы снижалась на 25-42%, а дегидрогеназ – лишь

на 33% (при 10% дизельного топлива). Активность гидролаз бурой полупустынной почвы была ингибирована дизельным топливом на 39-58% (инвертазы), 30-51% (фосфатазы) и 53-57% (уреазы).



**Рис. 3.** Ферментативная активность аридных почв после загрязнения нефтяными углеводородами, % от контроля: а) нефть, б) мазут, в) дизельное топливо, г) бензин. Условные обозначения: \* – статистическая достоверность отличия от контроля  $p < 0.05$ , \*\* –  $p < 0.01$

При загрязнении солончака бензином и росте дозы активность каталазы не изменялась, а активность дегидрогеназ при дозе 5 и 10% была ингибирована на 11 и 30% соответственно. Установлено значительное ингибирование инвертазы солончака уже при дозе 1% – на 57%, а с ростом до 5 и 10% ингибирование составило 60 и 63% от контроля соответственно. Активность уреазы также достоверно снижалась на 26% при 1% бензина в почве, а при 5 и 10% – на 32 и 35% соответственно. Активность фосфатазы солончака при дозе 5 и 10% снижалась на 11 и 25% соответственно.

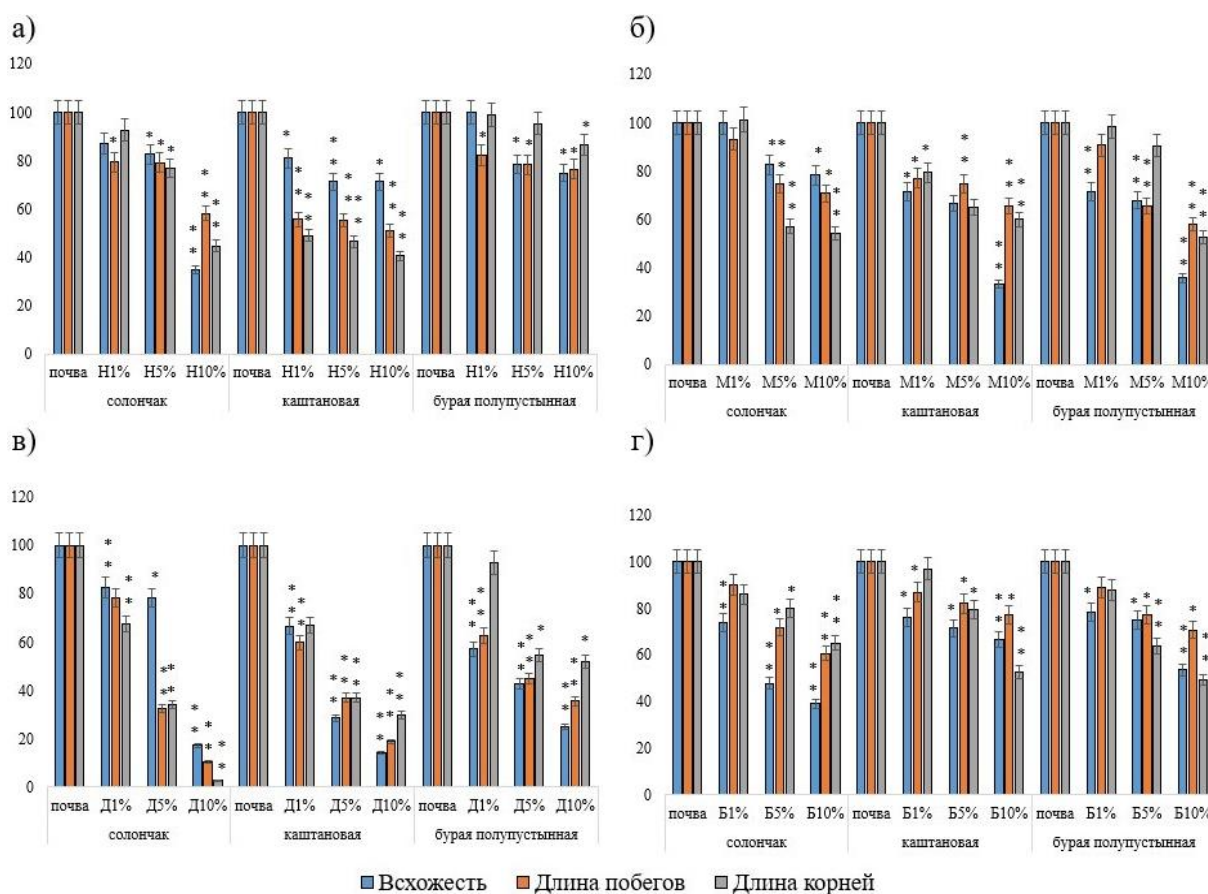
При загрязнении каштановой почвы бензином активность каталазы и дегидрогеназ была ингибирована уже при дозе 1% – на 14 и 23% соответственно. С ростом дозы до 5 и 10% от массы почвы снижение активности составило 23 и 29% (каталаза), 39 и 46% (дегидрогеназы). Активность фосфатазы и инвертазы в каштановой почве была более устойчива, чем активность уреазы при загрязнении наименьшей дозой бензина (1%). Однако при увеличении концентрации до 5 и 10% активность ферментов снизилась на 13 и 22% (инвертаза), 12 и 14% (фосфатаза), 61 и 63% (уреаза).

Внесение бензина в бурую полупустынную почву в дозе 1% от массы почвы не оказывало достоверного ингибирующего воздействия на активность дегидрогеназ, инвертазы и фосфатазы. При такой дозе в бурой полупустынной почве установлено снижение активности каталазы (на 21%) и уреазы (на 42%). При увеличении концентрации бензина до 5 и 10% от массы почвы установлено достоверное снижение активности каталазы (24 и 41%), дегидрогеназ (21 и 30%), инвертазы (14 и 24%), фосфатазы (15 и 23%) и уреазы (48 и 49%).

Таким образом, наибольшее токсическое воздействие на активность почвенных ферментов

оказывал мазут в бурой полупустынной и каштановой почвах. Наибольшая чувствительность среди всех изученных ферментов установлена для уреазы при загрязнении бензином, мазутом и дизельным топливом, инвертазы – нефтью, бензином и дизельным топливом.

**Фитотоксичность почв.** Наибольшее токсическое воздействие нефть оказала на всхожесть редиса в солончаке (13-65%), тогда как воздействие в каштановой и бурой полупустынной было значительно меньше (19-29%; рис. 4). Длина побегов редиса была максимально снижена (на 44-49%) при загрязнении каштановой почвы, а в солончаке при дозе 10% нефти – на 42%; при остальных дозах в солончаке и бурой полупустынной почвах этот показатель был выше – 18-23%. Длина корней редиса была больше всего снижена в каштановой почве при любой дозе нефти – на 51-59%, а в солончаке при 5 и 10% нефти – на 23 и 55% от контроля. В бурой полупустынной почве длина корней уменьшилась только при максимальной дозе нефти (10%) – на 13% от контроля.



**Рис. 4.** Фитотоксические показатели аридных почв после загрязнения нефтяными углеводородами, % от контроля: а) нефть, б) мазут, в) дизельное топливо, г) бензин. Условные обозначения: \* – статистическая достоверность отличия от контроля  $p < 0.05$ , \*\* –  $p < 0.01$

При загрязнении мазутом всхожесть была максимально снижена в каштановой и бурой полупустынной почвах – на 29-69% и 29-64% соответственно. В солончаке, загрязненном мазутом, снижение всхожести было не таким значительным – 17 и 22% при дозе 5 и 10%. Длина побегов равномерно снижалась при загрязнении мазутом в солончаке и каштановой почве, но максимальное снижение было установлено в бурой полупустынной почве: при дозе 10% снижение составило 42%. Длина корней при загрязнении мазутом снижалась в солончаке на 43 и 46% и в каштановой почве на 21-40%. В бурой полупустынной почве только при максимальной дозе мазута (10%) установлено снижение длины корней на 47%.

При загрязнении солончака, каштановой и бурой полупустынной почв дизельным топливом установлено значительное снижение всхожести редиса на 17-83%, 33-86% и 43-75% соответственно. Длина побегов была максимально ингибирована при загрязнении солончака (22-89%) и каштановой

почвы (40-81%), бурой полупустынной – на 37-64%. Длина корней при загрязнении солончака снижалась на 32-97%, каштановой почвы – на 33-70%, бурой полупустынной – на 7-48%.

Бензин в солончаке вызывал снижение всхожести редиса на 26-61%, в каштановой почве – на 24-33%, в бурой полупустынной – на 21-46%. Длина побегов также максимально была снижена в солончаке (10-39%) по сравнению с каштановой (13-23%) и бурой полупустынной почвами (11-29%). Длина корней была максимально ингибирована в бурой полупустынной почве – на 12-51%.

Таким образом, установлено, что максимальное снижение всхожести, длины побегов и корней редиса на солончаке, каштановой и бурой полупустынной почвах вызывается загрязнением дизельным топливом. Нефть, бензин и мазут влияли менее токсично на фитотоксические показатели почв. Наибольшей чувствительностью среди фитотоксических показателей обладает всхожесть и длина побегов.

*Интегральный показатель биологического состояния.* Интегральный показатель биологического состояния солончака, каштановой и бурой полупустынной почв при загрязнении нефтью, мазутом, дизельным топливом и бензином представлен в таблице 3. Солончак, согласно ИПБС, более устойчив к загрязнению нефтью, мазутом и дизельным топливом. Каштановая и бурая полупустынная почвы более устойчивы к загрязнению бензином. Наименьшей устойчивостью к загрязнению нефтью и нефтепродуктами, согласно ИПБС, обладает бурая полупустынная почва, наибольшей устойчивостью – солончак типичный.

**Таблица 3.** Интегральный показатель биологического состояния аридных почв при загрязнении нефтью, мазутом, бензином и дизельным топливом, %.

Загрязнитель	Солончак типичный			Каштановая почва			Бурая полупустынная почва		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
Нефть	89	79	61	79	73	65	76	66	60
Мазут	91	67	58	80	66	57	81	65	49
Дизельное топливо	80	68	44	75	59	51	76	64	48
Бензин	80	67	54	80	71	59	84	68	54

Для оценки состояния почв применяют различные интегральные показатели. Интегральный показатель ферментативной активности информативен при ремедиации нефтезагрязненных почв (Minnikova et al., 2023). Интегральный показатель биогенности при загрязнении почв Астраханской области более информативен, чем интегральный показатель биологической активности почвы (Пархоменко, 2018).

*Чувствительность и информативность биологических показателей при загрязнении аридных почв* нефтью, мазутом, дизельным топливом и бензином для каждого биологического показателя и каждого типа почв представлена в таблице 4.

При загрязнении солончака нефтью и дизельным топливом наибольшей чувствительностью обладает активность инвертазы (36 и 32%); при загрязнении мазутом и бензином – общая численность бактерий (49 и 37%). При загрязнении каштановой почвы нефтью наибольшей чувствительностью обладает длина корней (45%); при загрязнении мазутом – активность уреазы (46%); при загрязнении дизельным топливом и бензином – общая численность бактерий (31 и 37%). При загрязнении бурой полупустынной почвы нефтью самый чувствительный биологический показатель – обилие бактерий *Azotobacter* (13%); при загрязнении мазутом и бензином – общая численность бактерий (34 и 44%); при загрязнении дизельным топливом – всхожесть (42%).

Установлено, что при загрязнении дизельным топливом солончака, каштановой и бурой полупустынной почв происходит нарушение биологических показателей почвы более чем на 35%. Наименьшее токсическое воздействие на солончак и каштановую почвы оказывает нефть, а на бурую полупустынную – бензин.

Ряд чувствительности биологических показателей (обобщенный) к загрязнению нефтью и нефтепродуктами:

$$\text{активность каталазы} < \text{активность дегидрогеназ} =$$

= длина корней < активность инвертазы < активность уреазы < активность фосфатазы =  
 = длина побегов < всхожесть < **обилие бактерий рода Azotobacter** < **общая численность бактерий**

Наибольшей чувствительностью к загрязнению нефтью и нефтепродуктами обладает обилие бактерий рода Azotobacter и общая численность бактерий, а наименьшей – активность каталазы, дегидрогеназ и длина корней.

Информативность биологических показателей была рассчитана между значением биологических показателей и содержанием нефти, бензина, дизельного топлива и мазута для каждого типа почв (рис. 5).

При загрязнении солончака нефтью наиболее информативные показатели – это длина корней ( $r = -0.99$ ), активность дегидрогеназ ( $r = -0.99$ ) и обилие бактерий рода Azotobacter ( $r = -0.99$ ); при загрязнении мазутом это всхожесть ( $r = -0.95$ ); дизельным топливом – длина побегов ( $r = -0.96$ ) и длина корней ( $r = -0.96$ ); бензином – обилие бактерий рода Azotobacter ( $r = -1.00$ ). Наименее информативный показатель в данной почве – инвертаза ( $r = -0.65-0.75$ ), за исключением случаев загрязнения мазутом, когда наименее информативна общая численность бактерий ( $r = -0.81$ ).

**Таблица 4.** Чувствительность биологических показателей при загрязнении аридных почв нефтью и нефтепродуктами, % от контроля.

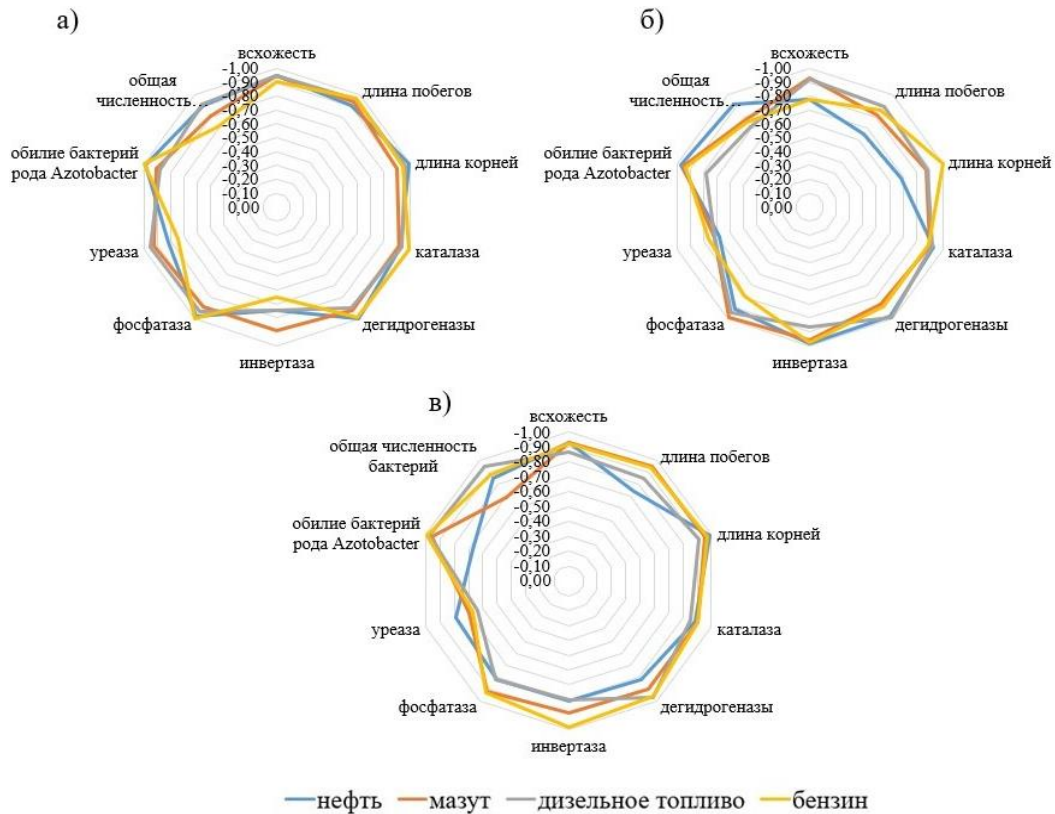
Солончак типичный				Каштановая почва				Бурая полупустынная почва			
нефть	мазут	ДТ*	бензин	нефть	мазут	ДТ	бензин	нефть	мазут	ДТ	бензин
Всхожесть											
68	87	59	54	75	57	37	71	85	58	42	69
Длина побегов											
72	79	40	74	54	72	39	82	79	71	48	79
Длина корней											
71	71	35	77	45	68	45	76	94	81	67	67
Активность каталазы											
86	79	96	96	83	55	81	78	86	71	67	71
Активность дегидрогеназ											
88	91	98	84	80	72	85	65	100	95	84	79
Активность инвертазы											
36	51	32	40	84	86	84	86	54	59	52	85
Активность фосфатазы											
75	56	68	86	79	75	87	88	57	67	57	84
Активность уреазы											
99	88	66	69	58	46	39	44	49	48	45	54
Обилие бактерий рода Azotobacter											
96	70	99	54	93	92	90	75	13	66	91	55
Общая численность бактерий											
70	49	46	37	68	54	31	37	57	34	55	44

**Примечание к таблице 4:** ДТ\* – дизельное топливо.

При загрязнении каштановой почвы нефтью наиболее информативен такой показатель, как активность инвертазы ( $r = -0.99$ ); мазутом – активность фосфатазы ( $r = -0.99$ ); дизельным топливом – активность дегидрогеназ ( $r = -0.99$ ); бензином – длина корней ( $r = -1.00$ ). Наименее информативны активность уреазы ( $r = -0.68-0.76$ ) и численность почвенных бактерий для всех нефтяных углеводородов кроме нефти ( $r = -0.71-0.77$ ). При загрязнении нефтью помимо уреазы наименее информативны все фитотоксические показатели, т.е. всхожесть ( $r = -0.78$ ), длина побегов ( $r = -0.65$ ) и корней ( $r = -0.68$ ).

При загрязнении бурой полупустынной почвы нефтью наиболее информативный показатель – это длина корней ( $r = -0.99$ ), а наименее – длина побегов ( $r = -0.74$ ), активность уреазы ( $r = -0.79$ ) и обилие бактерий рода Azotobacter ( $r = -0.67$ ). Наиболее информативный биологический показатель

при загрязнении мазутом определен как обилие бактерий рода *Azotobacter* ( $r = -0.96$ ), а наименее – активность уреазы ( $r = -0.69$ ) и общая численность бактерий ( $r = -0.70$ ); при загрязнении дизельным топливом – обилие бактерий ( $r = -0.98$ ), а наименее – активность уреазы ( $r = -0.63$ ); при загрязнении бензином самым информативным показателем также является обилие бактерий ( $r = -0.99$ ), а наименее информативным – активность уреазы ( $r = -0.67$ ).



**Рис. 5.** Коэффициенты корреляции между содержанием нефти, мазута, дизельного топлива и бензина и биологическими показателями.

Таким образом самым информативным показателем при загрязнении солончака, каштановой, нефтью является – длина корней (солончак, бурая полупустынная почва) и активность инвертазы (каштановая почва); при загрязнении мазутом всхожесть и длина корней (солончак, бурой полупустынной почв) и активность фосфатазы (каштановая почва); при загрязнении дизельным топливом – длина побегов и корне (солончак), активность фосфатазы (каштановая почва) и обилие бактерий рода *Azotobacter* (бурая полупустынная); при загрязнении бензином обилие бактерий рода *Azotobacter* (солончак и бурая полупустынная) и активность инвертазы (каштановая почва).

Обобщенный ряд информативности биологических показателей при загрязнении аридных почв нефтью и нефтепродуктами (от наименее информативного к наиболее информативному):

$$\begin{aligned} & \text{общая численность бактерий} < \text{активность уреазы} < \text{активность инвертазы} < \text{длина побегов} < \\ & < \text{всхожесть} < \text{активность фосфатазы} = \\ & = \text{обилие бактерий рода Azotobacter} < \text{активность каталазы} = \\ & = \text{длина корней} < \text{активность дегидрогеназ} \end{aligned}$$

Таким образом, наибольшей информативностью обладают активность каталазы, активность дегидрогеназ и длина корней, а наименьшей – общая численность бактерий и активность уреазы.

*Нормативы предельно-допустимого содержания нефти и нефтепродуктов в аридных почвах.* В результате расчета ИПБС (табл. 4) были построены уравнения регрессии (табл. 5), по которым определено значение предельно-допустимого содержания нефти, мазута, дизельного топлива и бензина для каждого типа почвы (табл. 6).

**Таблица 5.** Уравнения регрессии между содержанием нефти, мазута, бензина и дизельного топлива и откликом интегрального показателя биологического состояния (Колесников и др., 2019).

Загрязнитель	Типы почв		
	Солончак типичный	Каштановая почва	Бурая полупустынная почва
Нефть	$y = -10.93\ln(x) + 90.439$	$y = -5.691\ln(x) + 79.364$	$y = -6.922\ln(x) + 76.368$
Мазут	$y = -14.56\ln(x) + 91.073$	$y = -9.671\ln(x) + 80.374$	$y = -13.18\ln(x) + 82.173$
Дизельное топливо	$y = -14.02\ln(x) + 82.235$	$y = -10.53\ln(x) + 75.329$	$y = -10.34\ln(x) + 74.168$
Бензин	$y = -10.57\ln(x) + 80.886$	$y = -8.329\ln(x) + 81.024$	$y = -12.48\ln(x) + 84.95$

Экологический норматив для нефти в бурой полупустынной почве (0.1%) наименьший по сравнению с солончаком (1.0%) и каштановой почвой (0.2%). Допустимое содержание мазута в каштановой почве (0.4%) меньше, чем в солончаке (1.0%) и бурой полупустынной почве (0.5%). Содержание дизельного топлива в каштановой и бурой полупустынной почве одинаково и равно 0.2%, а в солончаке – выше в 3 раза (0.6%).

**Таблица 6.** Нормативы предельно-допустимого содержания нефтяных углеводородов в аридных почвах.

Загрязнитель	Солончак типичный	Каштановая почва	Бурая полупустынная почва
Нефть, %	1.0	0.2	0.1
Мазут, %	1.0	0.4	0.5
Дизельное топливо, %	0.6	0.2	0.2
Бензин, %	0.4	0.3	0.7

Максимальная разница в нормативах среди изученных типов почв установлена для нефти: разница между солончаком и каштановой с бурой полупустынными почвами составляет 5 и 10 раз. Исходя из этой информации, нужно учитывать, что каштановая и бурая полупустынные почвы более чувствительны к загрязнению нефтью, чем солончак. Установлена значительная разница в нормативах при загрязнении каштановой и бурой полупустынной почв мазутом: в 2.5 раза (каштановая) и в 2 раза (бурая полупустынная) по сравнению с солончаком. При загрязнении дизельным топливом разница была менее существенной, чем при загрязнении нефтью: в 3 раза меньше в каштановой и бурой полупустынных почвах, чем в солончаке. При загрязнении бензином наименьшее значение допустимого содержания установлено в каштановой почве (0.3%), а наибольшее – в бурой полупустынной (0.7%).

Согласно полученным экологическим нормативам, установлен обобщенный ряд токсичности нефти и нефтепродуктов от наименее токсичного к наиболее:

**мазут > бензин > нефть > дизельное топливо.**

По данным полученного ряда, наиболее экотоксично дизельное топливо, а наименее – мазут. Наибольшая экотоксичность топлива обусловлена содержанием в нем в равной пропорции парафиновых и нафтеновых углеводородов, его достаточной текучестью и проницаемостью (Бакун и др., 2017; Bogdanov et al., 2022; Kirgina et al., 2021). Эти свойства позволили ему проникнуть в тяжелосуглинистую каштановую почву и оказать максимальное токсическое воздействие на почвенную биоту (Зиннатуллина и др., 2014; Кондрашева, Еремеева, 2017; Кондрашева и др., 2018). В сравнении с бензином по своим свойствам дизельное топливо имеет в 1.6 раз больше водяного пара, в 2.3 раза больше кислорода и в 27.5 раз больше сажи (Карташевич и др., 2009; Марков и др., 1997). Эти параметры топлива обусловлены тем, что отработавшие газы дизелей представляют собой сложную многокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц. В свою очередь газы при использовании топлива на 99% состоят из продуктов полного сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) и воздуха с низким содержанием кислорода. Именно оставшиеся доли процента определяют токсичность выхлопа двигателя. По своему составу дизельное топливо вмещает больше

атомов углерода (от 9 до 25) в сравнении с бензином, который состоит из углеводородов с более короткой длиной цепи – от 4 до 12 атомов (Терра Экология, 2021). При разложении дизельного топлива помимо оксида углерода и паров воды в воздух и наземные экосистемы выделяется в 20 раз больше паров азота, чем при разложении бензина (Давыдова, Тагасов, 2004).

Высокая экотоксичность дизельного топлива была ранее оценена по реакции дождевых червей (*Eisenia fetida*). Были проведены три экотоксикологических теста оценки топлива и биодизелей (сафлорового метила, метиловый эфир касторки и этиловый эфир касторовой кислоты), включая 14-дневный тест на токсичность почвы с *Eisenia fetida*, чтобы изучить токсические эффекты трех биодизелей растительного происхождения – сафлорового метила, метилового эфира касторового масла и этилового эфира касторовой кислоты с дизельным топливом (Bamgbose, Anderson, 2020). В отличие от топлива, биодизели были менее токсичными, что видно по низкой смертности дождевых червей в тесте на токсичность почвы. Значительные реакции заболеваемости, такие как потеря веса, задняя и передняя фрагментация и чрезмерный сброс целомической жидкости, наблюдались у червей, подвергшихся воздействию биодизеля. А.А. Михайлова с соавторами (2011) установила, что дизельное топливо и моторное масло оказывают стимулирующее действие на показатели биологической активности дерново-подзолистой почвы при концентрации в почве меньше 50 г/кг, что связано с появлением питательного субстрата для микроорганизмов. Установлено, что в начале инкубации наиболее токсичен для дерново-подзолистой почвы бензин, а наименее – моторное масло. Длительность самоочищения почв, загрязненных дизельным топливом, небольшая, а бензином и моторным маслом – самая длительная.

Были составлены ряды устойчивости почв к загрязнению нефтью, мазутом, дизельным топливом и бензином. Ранжирование от наиболее устойчивого типа почв (наибольшего значения предельно-допустимого содержания нефтяных углеводородов) до наименее устойчивого (наименьшего значения предельно-допустимого содержания нефтяных углеводородов) приведено далее.

Ряд устойчивости почв по допустимому содержанию *нефти*:

солончак типичный > каштановая почва > бурая полупустынная почва.

Ряд устойчивости почв по допустимому содержанию *мазута*:

солончак типичный > бурая полупустынная почва > каштановая почва.

Ряд устойчивости почв по допустимому содержанию *дизельного топлива*:

солончак типичный > каштановая почва = бурая полупустынная почва.

Ряд устойчивости почв по допустимому содержанию *бензина*:

бурая полупустынная почва > солончак типичный > каштановая почва.

Наиболее устойчивой почвой к загрязнению нефтяными углеводородами (кроме бензина) является солончак, а наименее – бурая полупустынная (нефть и дизельное топливо) и каштановая (мазут и бензин) почвы. С учетом усредненных значений экологических нормативов наиболее чувствительной к загрязнению нефтью и нефтепродуктами является каштановая почва. Наименьшая устойчивость каштановой к загрязнению нефтью и нефтепродуктами обусловлена гранулометрическим составом этих почв, а именно соотношением глины, песка и ила, рН, содержанием органического вещества, окислительно-восстановительного потенциала, влажность почвы и других свойств. В каштановой почве, имеющей тяжелосуглинистый гранулометрический состав и сниженное содержание песка (по сравнению с солончаком и бурой полупустынной почвой) равно 47%, глины сдержится больше чем в солончаке и бурой полупустынной почве в 2.6 раз. Именно эти обстоятельства обуславливают задерживание нефти, мазута, бензина и дизельного топлива в почвенной толще и острое экотоксическое воздействие на почвенную биоту (Исакова, 2019). Загрязнение бурых лесных почв дизельным топливом вызвало существенные изменения содержания всех макроэлементов в наземной биомассе овса (*Avena sativa* L.; Wyszowski et al., 2020). Для улучшения баланса микроэлементов в почву вносили осадков сточных вод. Дизельное топливо также влияет на эмиссию CO<sub>2</sub> и повышение гидрофобности почв (Hewelke et al., 2018). Полученные нормативы допустимого содержания нефти в каштановой и бурой полупустынной почве меньше на 33 и 58%, чем нормативы, ранее предложенные в работе Р.М. Дауд (2019). Норматив содержания нефти в солончаке или уровень допустимого содержания загрязнений, предложенный Бабаевым М.П. с соавторами (2020), составляет 0.04%, что меньше предложенного в 25 раз. Вероятно, такое низкое значение уровня обусловлено методом расчета, включающим

величину бактериальной деградации и количество углеводов, которые окисляются одной бактериальной клеткой. В нашем исследовании учитывается не только микробиологическая составляющая, но также отклик ферментативной системы и оценка фитотоксичности почвы, загрязненной нефтяными углеводородами.

### Выводы

Установлено, что нормативы допустимого содержания нефти, мазута, дизельного топлива и бензина в аридных почвах значительно различаются. Наиболее устойчивой почвой к загрязнению нефтяными углеводородами является солончак, а наименее – каштановая почва. Среди нефтепродуктов наиболее токсично дизельное топливо, а наименее – мазут. Среди биологических показателей наибольшей чувствительностью к загрязнению нефтью и нефтепродуктами обладает обилие бактерий рода *Azotobacter* и общая численность бактерий, а наименьшей – активность каталазы, дегидрогеназ и длина корней. Наибольшей информативностью при загрязнении аридных почв нефтью и нефтепродуктами обладает активность каталазы и дегидрогеназ и длина корней, а наименьшей – общая численность бактерий и активность уреазы. Разработаны нормативы допустимого содержания нефти, мазута, дизельного топлива и бензина в солончаке, каштановой и бурой полупустынной почве. Результаты исследования целесообразно использовать при организации мероприятий по оценке состояния аридных почв после загрязнения нефтяными углеводородами.

*Финансирование.* Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») по созданию Молодежной лаборатории эковиотехнологий диагностики и охраны здоровья почв (№ СП-12-23-01), Министерства науки и высшего образования РФ, лаборатории «Здоровье почвы» Южного федерального университета (соглашение № 075-15-2022-1122), проекта Минобрнауки России «Лаборатория молодых ученых» в рамках Межрегионального научно-образовательного центра Юга России (№ ЛабНОЦ-21-01АБ, FENW-2021-0014).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаев М.П., Исмаилов Н.М., Наджафова С.И., Кейсерухская Ф.Ш., Оруджева Н.И.* 2020. К вопросу о разработке ПДК нефти и нефтепродуктов в различных типах почв на основе их ассимиляционного потенциала (на примере почв Азербайджана) // Почвоведение. № 11 (11). С. 1393-1400.
- Бакун В.Г., Яковенко Р.Е., Салиев А.Н., Сулима С.И., Земляков Н.Д., Некроенко С.В.* 2017. Получение синтетических низкодзастывающих дизельных топлив: технологии и перспективы // Инженерный вестник Дона. Т. 47. № 4 (47). С. 15.
- Бананова В.А., Лазарева В.Г.* 2014. Тенденции изменения ботанического разнообразия под влиянием опустынивания в республике Калмыкия // Аридные экосистемы. Т. 20. № 2 (59). С. 87-96. [*Bananova V.A., Lazareva V.G.* 2014. Trends of Changes in the Botanical Diversity under the Influence of Desertification in the Republic of Kalmykia // Arid Ecosystems. Vol. 4. No. 2. P. 119-126.]
- Бейсеев А.О., Бидайык А.Н.* 2020. Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами в зависимости от удаленности автодорог // Молодой ученый. № 25 (315). С. 367-371. [Электронный ресурс <https://moluch.ru/archive/315/71758/> (дата обращения: 24.09.2023)].
- Булуктаев А.А.* 2020. Сезонное изменение ферментативной активности почв заповедника «Черные Земли» // Полевые исследования. № 7. С. 134-143.
- Быкова М.В.* 2019. Проблема нормирования при оценке уровня загрязнения почв нефтепродуктами // Вестник Евразийской науки. № 6 [Электронный ресурс <https://esj.today/PDF/83NZVN619.pdf> (дата обращения 18.03.2024)].
- Вобликов Б.Г., Калашиник Ж.В., Усманов А.Х., Корнилов Ю.В.* 2011. Проблемы экологической безопасности и способы рекультивации земель, загрязненных нефтепродуктами, в Чеченской Республике. Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. №2. С. 73-77.
- Гайворонский В.Г., Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Неведомая Е.Н., Казеев К.Ш.* 2023. Способ определения экологически безопасного остаточного содержания нефти и нефтепродуктов в почвах в районе нефтеперерабатывающего предприятия // Гигиена и санитария. Т. 102 (9). С. 987-992.
- Геннадиев А.Н., Пиковский Ю., Цибарт А.С., Смирнова М.А.* 2015а. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. Т. 10. С. 1195-1209.
- Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Жидкин А.П., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С., Смирнова М.А., Хлынина Н.И., Цибарт А.С.* 2015б. Факторы и модификации углеводородного состояния почв // Почвоведение. № 11. С. 1314.

- Давыдова С.Л., Тагасов В.И. 2004. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде: учебное пособие. М.: Изд-во РУДН. 163 с.
- Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. 2019. Разработка региональных предельно допустимых концентраций нефти в почвах аридных экосистем юга России // Экология и промышленность России. Т. 23. № 9. С. 66-70.
- Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Биарсланов А.Б., Курбанисмаилова А.С. 2022. Почвы аридных регионов Юга России в базовой классификации почв мира. Аридные экосистемы. Т. 28. № 1 (90). С. 42-52. [Zalibekov Z.G., Mamaev S.A., Kurbanismailova A.S., Biarslanov A.B. 2022. Soils of Arid Regions of Southern Russia in the Basic Classification of Soils of the World // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 1. С. 34-42.]
- Зиннатуллина Г.М., Алипов Д.Е., Баулин О.А., Шахова Ф.А., Мухамадеева А.И., Карпенко Е.М., Гумерова Э.Т., Спащенко А.Ю. 2014. Влияние присадок на эксплуатационные и экологические характеристики дизельных топлив // Нефтегазовое дело. Т. 12. № 2. С. 92-99.
- Исакова Е. А. 2019. Особенности воздействия нефти и нефтепродуктов на почвенную биоту // Colloquium-journal. Vol. 12. No. 36. P. 7-10.
- Исмаилов Н.М., Алиева С.Р. 2019. Потенциальная роль грунтовых вод в загрязнении прибрежных вод Каспийского моря органическими поллютантами // Аридные экосистемы. Т. 25. № 3. С. 70-78. [Ismailov N.M., Alieva S.R. 2019. Potential Role of Groundwater in Pollution of Coastal Water of the Caspian Sea by Organic Pollutants // Arid Ecosystems. Vol. 9. No 3. P. 202-208.]
- Исмаилов Н.М., Гасымова А.С. 2016. Самоочищающая способность почв от нефти и нефтепродуктов в зависимости от структуры углеводородов // Аридные экосистемы. Т. 22. № 4 (69). С. 73-80. [Ismailov N.M., Gasumova A.S. Self-Clearing of Soil From Oil and Oil Products Depending on Structure of Hydrocarbons // Arid Ecosystems. Vol. 22. No 4 (69). P. 73-80.]
- Исмаилов Н.М., Наджафова С.И., Кейсеровская Ф., Гасымова А.С. 2020. К вопросу о показателе ассимиляционного потенциала почв как составной части паспорта почв и ассимиляционного потенциала ландшафтов // Аридные экосистемы. Т. 26. № 1 (82). С. 69-75. [Ismailov N.M., Nadzhafova S.I., Keyseruchskaya F., Gasumova A.S. 2020. Soil-Assimilation Potential as a Component of the Soil Passport and the Assimilation Potential of Landscapes // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 1. P. 58-62.]
- Карташевич А.Н., Товстыка В.С., Гурков Г.Н. 2009. Сравнительный анализ экологических показателей дизеля Д-243 при работе на рапсовом масле и дизельном топливе // Вестник Белорусско-Российского университета. № 4 (25). С. 10-14.
- Ковалева Е.И., Яковлев А.С. 2016. Научные подходы к нормированию загрязнения почв нефтепродуктами // Экология и промышленность России. Т. 20. № 10. С. 50-57.
- Ковалева Е.И., Яковлев А.С. 2018. Модель экологического нормирования нефтезагрязненных почв по изменению некоторых биогеоценотических функций // Экология и промышленность России. Т. 22. № 11. С. 34-39.
- Ковалева Е.И., Яковлев А.С., Пашкевич Е.Б. 2018. Ферментативная активность сухостепных почв в условиях нефтяного загрязнения // Проблемы агрохимии и экологии. № 4. С. 50-52.
- Колесников С.И., Дауд Р.М., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. 2019. Региональные нормативы содержания мазута в аридных почвах юга России // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. № 3 (288). С. 25-29.
- Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф., Денисова Т.В. 2007. Методология нормирования химического загрязнения почв на основе нарушения их экологических функций // Экология и промышленность России. С. 48-51.
- Колесников С.И., Спивакова Н.А., Везденеева Л.С., Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. 2011. Моделирование влияния химического загрязнения на биологические свойства гидроморфных солончаков зоны сухих степей Юга России // Аридные экосистемы. Т. 17. № 2 (47). С. 18-22. [Kolesnikov S.I., Spivakova N.A., Vezdeneeva L.S., Kuznetsova Y.S., Kazeev K.S. 2011. Modeling the Effect of Chemical Pollution on Biological Properties of Hydromorphic Solonchaks in the Dry Steppe Zone of Southern Russia // Arid Ecosystems. Vol. 1. No. 2. P. 83-86.]
- Колесников С.И., Спивакова Н.А., Везденеева Л.С., Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. 2013. Влияние модельного загрязнения нефтью на биологические свойства почв сухих степей и полупустынь юга России // Аридные экосистемы. Т. 19. № 2 (55). С. 58-63. [Kolesnikov S.I., Spivakova N.A., Vezdeneeva L.S., Kuznetsova Y.S., Kazeev K.S. 2013. Effect of Model Oil Pollution on Biological Properties of Soils of Dry Steppes and Semi-Deserts of Southern Russia // Arid Ecosystems. Vol. 3. No. 2. P. 101-105.]
- Кондрашева Н.К., Еремеева А.М. 2017. Изучение влияния присадок и добавок на эксплуатационные и экологические характеристики дизельного топлива // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). № 38 (64). С. 86-89.
- Кондрашева Н.К., Еремеева А.М., Нелькенбаум К.С. 2018. Снижение вредных выбросов при работе дизельного двигателя // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). № 42 (68). С. 54-57.

- Конюшкова М.В., Абатуров Б.Д. 2016. Особенности микрорельефа и свойства почв солонцового комплекса на поздних стадиях развития в Прикаспийской низменности // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. № 83. С. 53-76.
- Леонидова Т.В., Сидоренкова Н.К., Блохина Н.А., Харитонов И.Д. 2019. Содержание тяжелых металлов в придорожной зоне автомобильных трасс // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 1. С. 146-149. [Электронный ресурс <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12657>] (дата обращения 06.03.2024)].
- Ляшенко Г.М., Калинин В.П. 2012. Техногенное загрязнение почв свинцом в катене автомагистрали в приазовской зоне Ростовской области // Мелиорация и гидротехника. № 2. С. 60-74.
- Маркелов Д.А., Маркелов А.В., Минеева Н.Я., Акользин А.П., Кочуров Б.И., Шаповалов Д.А., Хуторова А.О., Григорьева М.А., Чукмасова Е.А. 2018. Нефтяное загрязнение ландшафтов Чечни: распознавание на местности – «Технологии с одного взгляда» // Экология урбанизированных территорий. № 2. С. 52-60.
- Марков В.А., Кислов В.Г., Хватов В.А. 1997. Характеристики топливоподачи транспортных дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 160 с.
- Маслобоев В.А., Евдокимова Г.А. 2012. Bioremediation of Oil Product Contaminated Soils in Conditions of North Near-Polar Area // Вестник Мурманского государственного технического университета. № 15 (2). С. 357-360.
- Минникова Т.В., Русева А.С., Ревина С.Ю., Колесников С.И., Гайворонский В.Г. 2023. Оценка эффективности биоремедиации нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы Республики Калмыкия (модельный эксперимент) // Аридные экосистемы. Т. 29. № 4 (97). С. 165-175. [Minnikova T.V., Ruseva A.S., Revina S.Yu., Kolesnikov S.I., Gaivoronsky V.G. 2023. The Level of the Efficiency of Bioremediation by Oil-Contaminated Brown Semi-Desert Soil of the Republic of Kalmykia (Model Experiment) // Arid Ecosystems. Vol. 13. No. 4. P. 518-526].
- Михайлова А.А., Наквасина Е.Н., Попова Л.Ф. 2011. Биологическая устойчивость почвы к нефтепродуктам // Arctic Environmental Research. Vol. 1. P. 32-37.
- Михайлова А.А., Попова Л.Ф., Наквасина Е.Н. 2016. Эколого-биологические особенности загрязнения нефтепродуктами почв Архангельска. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова. 150 с.
- Михайлова А.А., Попова Л.Ф., Наквасина Е.Н. 2018. Нефтепродукты в почвах: подходы к нормированию. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова. 145 с.
- Михедова Е.Е., Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Ланкин А.В., Ахметов Л.И., Узорина М.И. 2023. Использование биотестирования для оценки сорбционной биоремедиации нефтезагрязненной подзолистой почвы Западной Сибири // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Т. 28. № 4. С. 595-605.
- Мужехоев А.А., Шадрин Я.М., Дзармотова З.И. 2022. Специфика загрязнения почвы нефтепродуктами // Достижения науки и образования. № 5 (85). С. 98-101.
- Национальный атлас почв Российской Федерации. 2011 / Ред. С.А. Шоба. М.: Астрель. 632 с. [Электронный ресурс <https://soil-db.ru/soilatlas>] (дата обращения 03.05.2024)].
- Никитаева А.Ю., Бубликова Е.И. 2015. Проблемы и перспективы интеграционного развития нефтегазового комплекса Юга России // Вопросы регулирования экономики. Т. 6. № 2. С. 91-98.
- Новикова Н.М., Климанов А.В., Вышивкин А.А. 2010. Засоление почв солонцовых комплексов северной Калмыкии // Аридные экосистемы. Т. 16. № 1 (41). С. 51-65.
- Околелова А.А., Желтобрюхов В.Ф., Тарасов А.П., Кастерина Н.Г. 2015. Особенности нормирования нефтепродуктов в почвенном покрове // Фундаментальные исследования. № 12. С. 315-319.
- Островский Ю.В., Заборцев Г.М., Черноок В.А., Крестинин А.А. 2019. Комплексная рекультивация территории Павельцевской нефтебазы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. № 330 (6). С. 210-219.
- Панкова Е.И., Новикова А.Ф., Конюшкова М.В., Шадрин М.Б., Мухортов В.И. 2014. Почвы в зоне контакта светло-каштановых и бурых аридных почв на юге европейской России // Аридные экосистемы. Т. 20. № 3 (60). С. 79-93. [Pankova Y.I., Novikova A.F., Konyushkova M.V., Shadrina M.B., Mukhortov V.I. 2014. Soils at the Boundary between the Zones of Light Chestnut and Brown Arid Soils in the South of European Russia // Arid Ecosystems. Vol. 4. No. 3. P. 194-207.]
- Пархоменко А.Н. 2018. Эколого-биологическое состояние почв Астраханской области в условиях антропогенного воздействия // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. Т. 8. № 1. С. 129-134.
- Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н. 2003. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. № 9. С. 1132-1140.
- Рогозина Е.А., Шиманский В.К. 2007. Некоторые теоретические аспекты восстановления нефтезагрязнённых почвенных экосистем // Нефтегазовая геология. Теория и практика. Т. 2. Статья № 12. 16 с.
- Русаков Н.В., Водянова М.А., Стародубова Н.Ю., Донерьян Л.Г. 2017. Методологические и концептуальные проблемы нормирования нефтезагрязнений в почве // Гигиена и санитария. Т. 96. № 10. С. 929-933.
- Седых В.А., Кашанский А.Д., Химица Е.Г., Карауш П.Ю. 2011. Изменение подвижности тяжелых металлов в

- дерново-подзолистых почвах в зависимости от степени их гумусированности и применения высоких доз органических удобрений // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. № 3. С. 17-25.
- Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Писарева А.В. 2016. Геохимическая характеристика антропогенно-преобразованных ландшафтов // Агрехимия. № 10. С. 96.
- Терехова В.А., Прудникова Е.В., Кирюшина А.П., Карпухин М.М., Плеханова И.О., Якименко О.С. 2021. Фитотоксичность тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности // Почвоведение. № 6. С. 757-768.
- Терра Экология. 2021. Как дизельное топливо влияет на экологию? [Электронный ресурс <https://terra-ecology.ru/stati/kak-dizelnoe-toplivo-vliyaet-na-ekologiyu/>] (дата обращения 03.05.2024)].
- Хаустов А.П., Редина М.М. 2017. Углеродородное загрязнение почв и грунтов: практика нормирования, проблемы и тенденции // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 1. С. 3-14.
- Шагидуллин Р.Р., Латыпова В.З., Иванов Д.В., Шагидулина Р.А., Тарасов О.Ю., Петров А.М. 2011. Нормирование допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах // Георесурсы. № 5 (41). С. 2-5.
- Шаркова С.Ю. 2011. Изменение химических характеристик почвы под действием нефтезагрязнения // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. № (25). С. 610-613.
- Vamgbose I.A., Anderson T.A. 2020. Ecotoxicity of Three Plant-Based Biodiesels and Diesel Using, *Eisenia fetida* // Environmental Pollution. No. 260. P. 113965.
- Bogdanov I.A., Altynov A.A., Kirgina M.V. 2022. Hydrogen-Free Upgrading on ZSM-5 Type Zeolite Catalyst – Efficient Way to Obtain Low-Freezing Diesel Fuel // South African Journal of Chemical Engineering. Vol. 41. P. 1-9.
- Hewelke E., Szatyłowicz J., Hewelke P., Gnatowski T., Aghalarov R. 2018. The Impact of Diesel Oil Pollution on the Hydrophobicity and CO<sub>2</sub> Efflux of Forest Soils // Water, Air, and Soil Pollution. Vol. 229. Article No. 51.
- Kirgina M.V., Bogdanov I.A., Altynov A.A., Belinskaya N.S., Orlova A.M., Nikonova N.P. 2021. Studying the Impact of Different Additives on the Properties of Straight-Run Diesel Fuels with Various Hydrocarbon Compositions // Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles. Vol. 76. No. 40. P. 1-13.
- Kolesnikov S., Kuzina A., Minnikova T., Akimenko Y., Nevedomaya E., Ter-Misakyants T., Kazeev K. 2022. Environmental Standards of Content of Petroleum Hydrocarbons and Pb, Cr, Cu, Ni in Soils of Wet and Dry Subtropics // Sains Tanah Journal of Soil Science and Agroclimatology. No. 19 (2). P. 7-20.
- Kolesnikov S.I., Gayvoronskiy V.G., Kazeev K.S., Dadenko E.V., Denisova T.V., Tishchenko S.A. 2013. Simulation of Ordinary Chernozem Pollution by Heavy Oil to Determine Environmentally Safe Concentrations // World Applied Sciences Journal. Vol. 25. No. 9. P. 1339-1342.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. 2019. Development of Regional Standards for Pollutants in the Soil Using Biological Parameters // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 191. No. 9. P. 544.
- Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Ruseva A., Gaivoronsky V. 2023. Enzymatic Assessment of the State of Oil-Contaminated Soils in the South of Russia after Bioremediation // Toxics. No. 11. P. 355.
- Revina S., Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S., Kutasova A. 2024. Catalase Activity as a Diagnostic Indicator of the Health of Oil-Contaminated Soils after Remediation // Environmental Monitoring and Assessment. No. 196. P. 449.
- Ruseva A., Minnikova T., Kolesnikov S., Trufanov D., Minin N., Revina S., Gaivoronsky V. 2024. Assessment of the Ecological State of Haplic Chernozem Contaminated by Oil, Fuel Oil and Gasoline after Remediation // Petroleum Research. No. 9. P. 155-164.
- Sales da Silva I.G., Gomes de Almeida F.C., Padilha da Rocha e Silva N.M., Casazza A.A., Converti A., Asfora Sarubbo L. 2020. Soil Bioremediation: Overview of Technologies and Trends // Energies. No. 13. P. 4664.
- Shivprasad S., Page W.J. 1989. Catechol Formation and Melanization by Na<sup>+</sup> Dependent *Azotobacter chroococcum*: A Protective Mechanism for Aeroadaptation? // Applied and Environmental Microbiology. Vol. 55. No. 7. P. 1811-1817.
- Stepanova A.Y., Gladkov E.A., Osipova E.S., Gladkova O.V., Tereshonok D.V. 2022. Bioremediation of Soil from Petroleum Contamination // Processes. No. 10. P. 1224.
- Sui X., Wang X., Li Y., Ji H. 2021. Remediation of Petroleum-Contaminated Soils with Microbial and Microbial Combined Methods: Advances, Mechanisms, and Challenges // Sustainability. No. 13. P. 9267.
- Wyszkowski M., Wyszkowska J., Borowik A., Kordala N. 2020. Contamination of Soil with Diesel Oil, Application of Sewage Sludge and Content of Macroelements in Oats // Water, Air, & Soil Pollution. No. 231. P. 546.
- World Reference Base for Soil Resources (WRBSR). 2022. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences, IUSS. P. 234.

**ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ  
В РАЙОНЕ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ**

© 2024 г. Ш.Г. Идармачев, В.И. Черкашин, А.Ш. Идармачев

*Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН  
Россия, 367030, г. Махачкала, ул. Ярагского, д. 75. E-mail: dangeo@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.06.2024. После доработки 01.08.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

В данной работе на примере Чиркейского водохранилища рассмотрено влияние его гидродинамического режима, вызывающее негативные экзогенные процессы, связанные с активизацией оползней и разливов воды. Например, один из оползневых массивов, расположенный в 1 км от высотной плотины гидроэлектростанции, способен вызвать волну высотой 10 и более метров, а прорыв Тишиклинской земляной дамбы длиной 1 км, расположенной в восточной части водохранилища, может привести к затоплению большой территории с сельскохозяйственными угодьями и населенными пунктами. Географически Чиркейское водохранилище расположено в Дагестане (42° 58' 00" с.ш., 46° 53' 00" в.д.) Учитывая небольшой процент земель, пригодных для сельскохозяйственной деятельности в горной части Дагестана, сохранение и предотвращение затоплений плодородных земель является важной народнохозяйственной задачей.

В Республике Дагестан расположены 7 гидроэлектростанций с плотинами высотой от 40 до 232 м. Службы на них ограничиваются мониторингом состояния плотин. Однако не уделяется должное внимание мониторингу опасных геологических процессов в районах водохранилищ. В настоящей статье приводятся результаты геофизического мониторинга, позволяющего обнаружить деформацию оползневого тела под воздействием сезонного изменения уровня водохранилища.

*Ключевые слова:* гидродинамический режим, геодинамика, опасные геологические процессы, геоморфология, разливы рек, причина и механизм, последствия, геоэлектрический разрез горных пород, кажущееся электрическое сопротивление, дипольное зондирование, питающий диполь.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-145-150**

**EDN: FYYJOW**

Разлив рек на почвенной поверхности земли играет как положительную, так и отрицательную роль в развитии природных процессов. Образовавшиеся водоемы служат дополнительным источником воды для растений и животных, способствуют перемешиванию плодородного почвенного слоя, переносу питательных веществ и т.д. В то же время они оказывают негативное воздействие: разливы на больших площадях могут вызвать серьезные проблемы для сельского хозяйства и наносить значительный ущерб инфраструктуре. Особенно остро эта проблема стоит в зонах строительства гидроэлектростанций (ГЭС), где с целью накопления воды перекрываются реки, что приводит к нарушению гидродинамического режима и к изменению состава и свойств горных пород, а это, в свою очередь, к различным опасным процессам – оползням, обвалам, селям и т.д. Согласно статистике, до 80% современных оползней связано с деятельностью человека (Сулейманов и др., 2022). Одним из таких примеров является строительство ГЭС, для которых в большинстве случаев предопределено создание водохранилищ. Их гидродинамический режим приводит к подтоплению береговых зон, разжижению больших грунтовых масс, возникновению оползневых процессов под действием гравитационных сил, действующих на горные породы, находящиеся в неустойчивом состоянии. Гидродинамический режим водохранилища влияет на процесс переформирования рельефа береговой зоны вследствие периодического изменения уровня воды, приводящего к регулярным сезонным деформациям массивов береговой зоны, которые ослабляют их механическую устойчивость. Особую опасность представляют оползневые массивы в горных

водохранилищах с обрывистыми берегами. Известно немало примеров таких оползней с катастрофическими последствиями. Например, в 1963 году в Италии обрушение оползня в водохранилище привело к образованию гигантской волны высотой более 200 м, что повлекло за собой гибель 1800 человек.

Оползни являются одним из самых распространенных геомеханических процессов как в горных районах, так и на равнинах. Существует проблема строительства сооружений на оползнеопасной территории и своевременного предупреждения об опасной активизации оползней при эксплуатации этих сооружений. Для изучения оползневых процессов используются всевозможные методы технических средств контроля, совершенствуются методы математического и лабораторного моделирования. В то же время проведение геофизического мониторинга на оползневых склонах водохранилищ должно обеспечить решение двух основных научно-исследовательских задач: во-первых, изучение механизма и динамики оползневого процесса для контроля происходящих событий на всем этапе его формирования – от медленной деформации до отрыва от плоскости скольжения; во-вторых, разработку новых эффективных методов исследований для непрерывного мониторинга различных параметров оползневого тела в удаленном режиме измерений, что является актуальной научно-исследовательской задачей для обеспечения безопасной эксплуатации ГЭС.

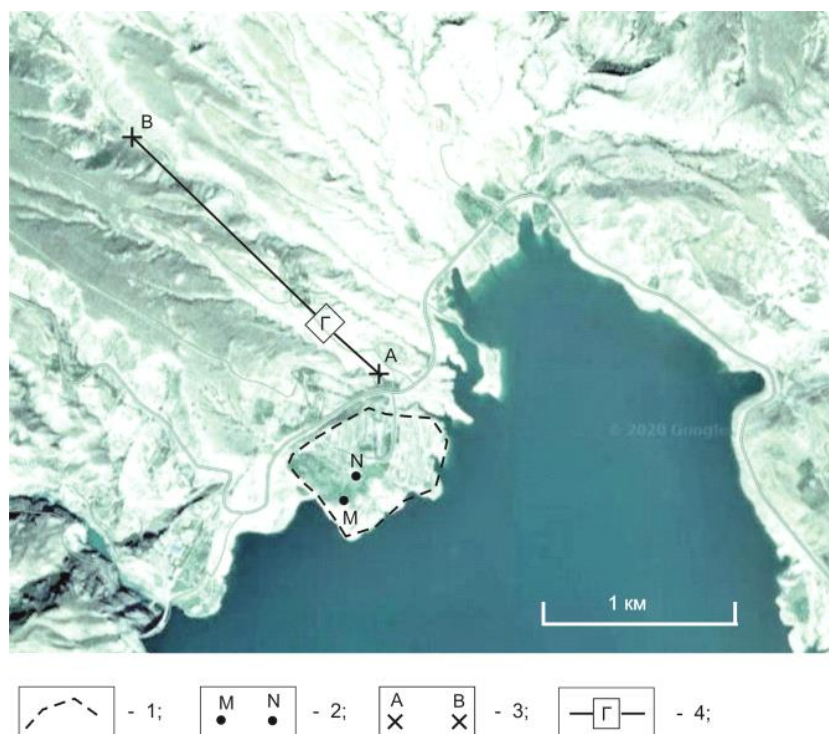
Учитывая важность всестороннего изучения оползневых процессов, в качестве эксперимента на Чиркейском водохранилище были проанализированы все картографические материалы, связанные с его прибрежным районом, для определения расположений потенциально опасных оползневых массивов. Один из них расположен наиболее близко к плотине (на расстоянии 1200 м) и имеет объем более 1 млн. м<sup>3</sup> (рис. 1). Причиной выбора данного массива (на рисунке 1 он обозначен штрих-пунктиром) является тот факт, что после наполнения водохранилища береговая часть данной структуры начала деформироваться (проседать), в результате чего образовались крупные вертикальные трещины отрыва, что и определило место проведения экспериментальных исследований методом дипольного электрического зондирования.

### Материалы и методы

Геофизические наблюдения в районе Чиркейского водохранилища были начаты еще в середине 1976 года, спустя полтора года после начала его заполнения. Целью режимных наблюдений за электрическими, магнитными и другими полями являлось исследование механизма плотинных землетрясений. Для решения поставленной задачи было сконструировано соответствующее измерительное оборудование. Например, для создания в земной коре электрического поля, позволяющего проводить исследования электрических параметров горных пород на площади более 300 км<sup>2</sup> в районе водохранилища, использовалась силовая установка с дипольным моментом  $P = 4 \cdot 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}$  (А – сила тока). Генератором тока служила специально разработанная установка с пиковой мощностью 120 кВт, позволяющая пропускать в землю ток до 200 А. Более подробное описание дипольного зондирования в районе Чиркейского водохранилища, а также результаты исследований опубликованы в работах Ш.Г. Идармачева с О.М. Барсуковым (1978) и Ш.Г. Идармачева с С.С. Арефьевым (2009).

Анализ научно-исследовательских работ, проведенных за период 1977-1980 гг., позволил сделать вывод о том, что результаты режимных наблюдений за кажущимся электрическим сопротивлением массива горных пород могут быть использованы для изучения опасных геологических процессов в районах ГЭС, в т.ч. оползневых. В связи с этим в настоящей работе исследуется механизм изменения электрических параметров оползневого массива на основе геодинамической модели образования вертикальных трещинных зон в земной коре в условиях засушливого климата.

С начала появления на оползневом теле первых трещин были начаты повторные измерения кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ) методом электрического зондирования через каждые 3-4 суток. Для этого использовался питающий диполь длиной 2 км, расположенный за пределами оползня, и приемный длиной 50 м, закрепленный на оползне. Кажущееся сопротивление пород оползневого массива отличается от удельного сопротивления тем, что первое характеризует сопротивление реальной анизотропной среды с учетом слоистости пород с различными удельными сопротивлениями и их геометрическими размерами. Для однородных пород величины кажущегося и удельного сопротивлений совпадают.



**Рис. 1.** Карта расположения оползневой участка (1), приемных электродов (2), питающих электродов (3) и электрического генератора тока.

Электроды питающего диполя создавались при помощи 10 металлических стержней, забитых в землю на глубину 1.5 м, которые затем сваривали между собой общей шиной. Электроды подключали к генератору тока с помощью электрической линии, подвешенной на столбах с изоляторами. Общее сопротивление нагрузки генератора составляло 10 Ом. Стационарными электродами приемного диполя служили свинцовые пластины  $20 \times 20$  см, закопанные в почву на глубину 0.5 м. Место расположения приемных и питающих электродов установки дипольного зондирования указано на рисунке 1. Питающие электроды расположены за пределами оползневой тела, а приемные – в его центре. Такая расстановка позволяет исследовать динамические процессы деформирования оползня, связанные с изменением уровня воды в водохранилище. Погрешность измерений  $\rho_k$  не превышает  $\pm 2\%$  (Идармачев и др., 2012).

### Результаты и обсуждение

За неполные периоды полевых исследований 1977, 1978 и 1980 гг. и наблюдения уровней воды в водохранилище были составлены графики кажущегося сопротивления (рис. 2). Уровень водохранилища имеет сезонный ход. В весенне-летний период он резко увеличивается на 40 м в результате паводка горных рек, а зимой снижается за счет уменьшения притока воды и расхода в турбинах ГЭС. Максимум устанавливается в августе, минимум – в апреле.

Сезонное увеличение уровня воды в водохранилище приводит к уменьшению кажущегося электрического сопротивления пород по мере их обводнения, т.к. удельное сопротивление горной породы определяется удельным сопротивлением воды, заполняющей поровое пространство породы. Следовательно, между изменением уровня воды и кажущимся сопротивлением должна быть связь. Однако возможны и другие механизмы взаимодействия с нелинейным изменением уровня подземных вод, которые могут реализоваться в результате заполнения в известняках трещинных геологических структур или полостей карстовых пустот.

Из сравнения графиков кажущегося сопротивления и уровня воды в различные годы видно, что явного согласия между ними нет. Например, с мая по сентябрь 1977 года уровень возрастает на 40 м, что должно привести к уменьшению сопротивления пород в результате их обводнения. Однако на графике  $\rho_k$  вместо ожидаемого его уменьшения наблюдается увеличение, что противоречит

процессу обводнения пород, т.к. увеличение объема воды в породе приводит всегда к уменьшению электрического сопротивления. Данное противоречие между изменениями кажущегося сопротивления большого неоднородного массива, состоящего из различных пород и уровня воды в его основании, может быть связано с образованием трещин, которые еще не успели заполниться водой. Деформация массива с образованием в нем вертикальных трещин нарушает электрический контакт и тем самым может вызвать изменение величины кажущегося сопротивления, в т.ч. ее увеличение.

В 1978 г., как и ожидалось, наблюдается понижение  $\rho_k$  с ростом уровня воды, а в 1980 г. связь с уровнем отсутствует. Поэтому для анализа графиков рассматривалось несколько геоэлектрических моделей, позволяющих объяснить связь кажущегося сопротивления с уровнем воды.

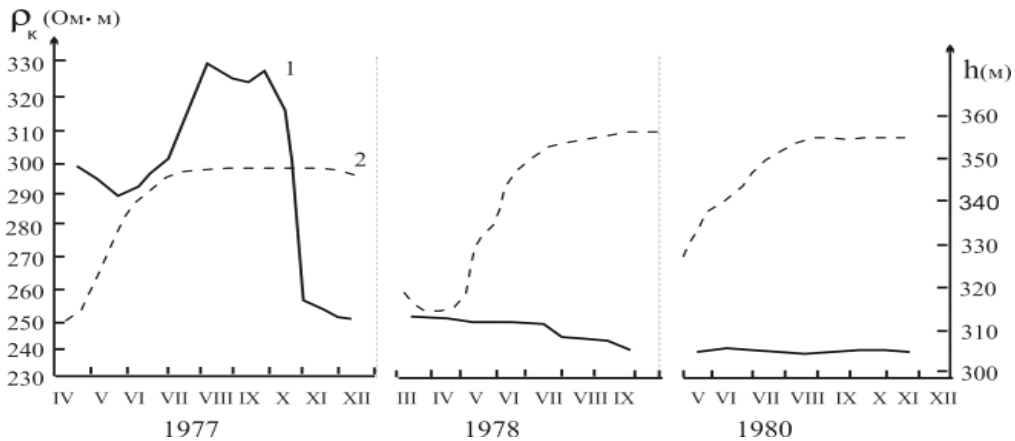


Рис. 2. Графики кажущегося сопротивления (1) и уровня воды в водохранилище (2).

Первая модель предполагает повышение уровня подземных вод в массиве синхронно с уровнем водохранилища. Оценка производилась по известной формуле расчета  $\rho_k$  двухслойной среды с горизонтальной слоистостью (Электроразведка, 1989):

$$\rho_k = \rho_1 \rho \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n r^3}{(r^2 + (2nh_1)^2)^{3/2}} \right\} \quad (1),$$

где  $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ ,  $\rho_1$  – удельное сопротивление первого слоя без воды,  $\rho_2$  – удельное сопротивление слоя с водой,  $h_1$  – мощность слоя выше уровня воды (ниже уровня воды считается как бесконечность),  $r$  – расстояние между приемным и питающим диполями.

Расчет проводился для следующих параметров модели:  $r = 800$  м,  $\rho_1 = 350$  Ом·м,  $\rho_2 = 200$  Ом·м,  $h_1 = 100$  м. Данные, за исключением  $r$ , являются приближенными. Значение  $\rho_1$  соответствует кажущемуся сопротивлению оползневой массива, измеренному четырехэлектродной установкой с геометрическими размерами диполей: питающий  $AB = 300$  м, приемный  $MN = 80$  м. Такая длина  $AB$  позволяет измерять электрическое сопротивление слоя породы толщиной примерно  $AB/3 = 100$  м.

Значение  $\rho_2$  приближенно равно удельному сопротивлению меловых пород, расположенных ниже уровня воды. Его оценка производилась путем измерения  $\rho_k$  четырехэлектродной установкой на местности на берегу водохранилища. Значение  $h_1$  соответствует превышению места расположения приемного диполя на оползне относительно минимального сезонного уровня воды в водохранилище.

После постановки численных значений в (1) получаем кажущееся сопротивление оползневой массива  $\rho_k = 240$  Ом·м.

Таким же методом оцениваем изменение кажущегося сопротивления, связанное с сезонным увеличением уровня воды в весенне-летний период на 40 м. Тогда  $h_1 = 60$  м, а остальные значения  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $r$  остаются прежними. Подставляя их в (1), имеем  $\rho_k = 210$  Ом·м.

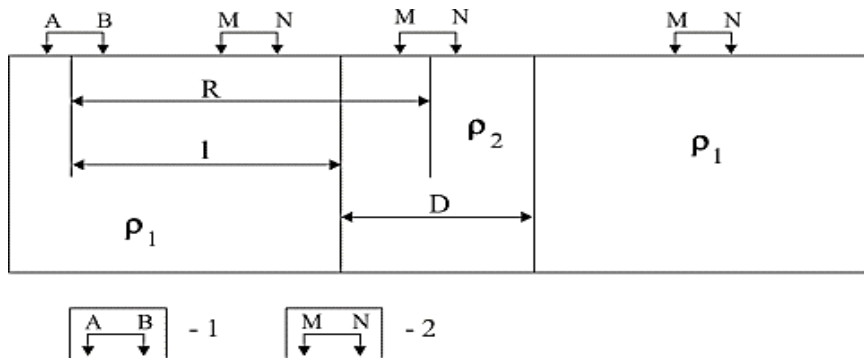
Согласно данной модели, с подъемом уровня воды на 40 м, величина кажущегося сопротивления исследуемого массива должна уменьшиться на 30 Ом·м, при этом данный процесс должен повторяться для каждого весенне-летнего сезона повышения уровня водохранилища. Однако, как видно из графиков (рис. 2), подобного между ними не наблюдается.

Коэффициенты корреляции для разных лет составляют:  $K = 0.21$  для 1977 г.,  $K = -0.34$  для 1978 г.,

$K = 0.15$  для 1980 г. При этом в 1978 году видна слабая отрицательная связь, но ее тоже нельзя считать значимой, а в остальные годы связь отсутствует. Следовательно, рассмотренный фильтрационный механизм синхронного изменения уровней воды в исследуемом массиве и водохранилище не находит своего объяснения для модели двухслойной геоэлектрической среды горных пород, а, скорее всего, показывает, что в период заполнения процесс фильтрации воды происходит сложным образом.

Далее для анализа полученных результатов была рассмотрена альтернативная геоэлектрическая модель с вертикальным проводящим пластом. Такая модель позволяет объяснить, как понижение, так и повышение  $\rho_k$  в зависимости от взаимного расположения диполей измерительной установки относительно вертикального пласта.

В исследованиях Ю.А. Алелова и В.М. Любошиц (1981) рассмотрена такая геоэлектрическая модель (рис. 3) бесконечного по простиранию вертикального пласта с удельным сопротивлением  $\rho_2$  и удельным сопротивлением вмещающей среды  $\rho_1$ .



**Рис. 3.** Модель расчета  $\rho_k$  для вертикального проводящего пласта D. Дипольная установка расположена в крест простирания пласта. Центр питающего диполя находится на расстоянии R от центра пласта D. Условные обозначения: 1 – питающий диполь АВ, 2 – приемный диполь MN, D – ширина пласта, R – расстояние между центрами питающего и приемного диполей, l – расстояния от центра питающего диполя до края пласта D.

Формула вычисления  $\rho_k$ , когда приемный диполь MN находится перед пластом D, имеет следующий вид:

$$\rho_k = \rho_1 \left[ 1 - k \left( \frac{y}{l - y} \right)^3 + \frac{1 - k^2}{k} \sum_{n=1}^{\infty} k^{2n} \left( \frac{y}{l - y + n} \right)^3 \right] \quad (2),$$

где  $y = R / 2D$ .

В случае, когда MN находится за пределами проводящего пласта, формула выглядит так:

$$\rho_k = \rho_1 (1 - k^2) \sum_{n=0}^{\infty} k^{2n} \left( \frac{y}{y + n} \right)^3 \quad (3).$$

Для расчета  $\rho_k$  по формуле (2) использовались следующие численные значения:  $R = 800$  м,  $D = 100$  м,  $l = 1000$  м,  $\rho_1 = 350$  Ом·м,  $\rho_2 = 200$  Ом·м. Для указанных значений  $\rho_k = 420$  Ом·м, т.е. кажущееся сопротивление увеличилось на 70 Ом·м по сравнению с  $\rho_1$ .

Расчет модели для случая, когда пласт располагается между измерительными диполями, проводился по формуле (3) при тех же численных значениях, за исключением  $l = 350$  м. Полученное значение  $\rho_k = 180$  Ом·м ниже на 170 Ом·м по сравнению с  $\rho_1$ . Таким образом, вторая модель вертикального проводящего пласта на качественном уровне позволяет объяснить вариации  $\rho_k$  в 1977 г.

Вариации  $\rho_k$  в 1978 и 1980 гг. сильно отличаются по форме от данных, полученных в 1977 г. Для них наблюдается медленное понижение  $\rho_k$ , характеризующее необратимый процесс фильтрации воды в массив и повышение уровня подземных вод. Такое контрастное различие вариаций  $\rho_k$  в разные годы, возможно, связано с повышением в 1977 году геодинамической активности района и засушливости климатических условий.

В непосредственной близости от водохранилища расположены такие глубинные разломы Прикаспия, как Срединный, Пшекиш-Тырнаузский, Наратюбинский и другие, формирующиеся в

районе поле тектонических напряжений. Через ложе водохранилища прослеживаются также Андийско-Сулакский и Аварско-Сулакский разломы (Скарятин, 1976). О геодинамической активности разломов в районе Чиркейского водохранилища свидетельствует факт резкого повышения сейсмической активности в период заполнения водохранилища в 1974 и 1975 гг. (Идармачев и др., 2012).

15 мая и 22 октября 1977 года в районе водохранилища произошли два землетрясения магнитудой  $M = 3.5$  на эпицентральных расстояниях 11 км и 5 км от оползневого массива соответственно. Таким образом, аномальные вариации  $\rho_k$  могут быть связаны как с тектонической активностью разломов в районе водохранилища, вызвавшей деформацию оползневого массива с образованием в нем вертикальных трещин отрыва, так и с проникновением воды в тело оползня.

### Выводы

1. Системный анализ экзогенных событий в горной части Республики Дагестан показал, что наряду с природными факторами, такими как обвалы, сели, сходы лавин, происходит множество техногенных событий, причиной которых являются изменения уровня воды в гидростанциях и других объектах, что предопределяет обязательное наблюдение за уровнем режимом водохранилищ и других объектов.

2. Результаты электрического зондирования оползневого массива в районе Чиркейского водохранилища показали, что процесс фильтрации воды происходит сложным образом. Изменение уровней подземных вод и водохранилища в районе оползня не коррелируют между собой. На основе анализа различных геоэлектрических моделей и сравнения их с данными полевых измерений кажущегося сопротивления исследуемого массива предложен механизм фильтрации воды, позволяющий объяснить изменение электрических параметров оползневого тела в период весенне-летнего повышения уровня водохранилища. Основную роль в данном механизме играют вертикальные трещинные зоны, подверженные деформации в поле меняющихся тектонических напряжений в данном районе. О деформации исследуемого массива свидетельствует совпадение максимальных вариаций кажущегося сопротивления с сейсмическими событиями района. В начале фильтрация воды происходит по вертикальным трещинным зонам, затем уровень подземных вод постепенно повышается в остальном массиве, снижая его механическую прочность и устойчивость к деформации.

3. Полученные данные позволяют предложить метод электрического зондирования с большими разносами диполей для изучения трещинных пород, выявления потенциальных оползневых массивов в районе водохранилища при проектировании ГЭС, а также для контроля динамических характеристик оползней в зоне действующих ГЭС.

*Финансирование.* Работа выполнена и финансируется в рамках госзадания Института геологии ДФИЦ РАН № 1021060808491-6-1.5.6 «Изучение, мониторинг и прогноз катастрофических геологических процессов природного и техногенного происхождения на территории Восточного Кавказа».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алелов Ю.А., Любошиц В.М. 1981. Об одном из электрических предвестников землетрясений // Физика Земли. № 10. С. 103-107.
- Идармачев Ш.Г., Арефьев С.С. 2009. Результаты дипольного электромагнитного зондирования в районе Чиркейского водохранилища после его заполнения // Физика Земли. № 9. С. 75-85.
- Идармачев Ш.Г., Барсуков О.М. 1978. «Плотинные» землетрясения и вариации электросопротивления массива горных пород в районе Чиркейского водохранилища // Доклады АН СССР. Т. 240. № 2. С. 301-305.
- Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Абдуллаев Ш.-С. О., Идармачев А.Ш. 2012. Возбужденная сейсмичность в районе Чиркейского водохранилища и ее проявления в геофизических полях // Труды Института геологии ДНЦ РАН. Махачкала: Aleph. 104 с.
- Скарятин В.Д. 1976. Применение метода многоступенчатой генерализации при изучении структур разного масштаба (на примере Северного Кавказа). Исследование природной среды космическими методами // Геология и геоморфология. М. С. 123-128.
- Сулейманов В.К., Идрисов И.А., Черкашин В.И., Мамаев А.С. 2022. Численная оценка селевой опасности балок горы Джалган // Труды Института геологии ДНЦ РАН. № 2 (89). С. 63-67.
- Электроразведка. 1989. М.: Наука. 437 с.

УДК 504.455

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ  
ИСКУССТВЕННЫХ ВОДОЕМОВ КАЛМЫКИИ**

© 2024 г. С.С. Уланова\* \*\*, Н.М. Новикова\*\*, И.А. Горяев\*\*\*

*\*Институт комплексных исследований аридных территорий  
Россия, Республика Калмыкия, 358005 г. Элиста, ул. Хомутникова, д. 111  
E-mail: svetaulanova@yandex.ru*

*\*\*Институт водных проблем РАН  
Россия, 119333 г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: ntnovikova@gmail.com*

*\*\*\*Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН  
Россия, 197022 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2. E-mail: gorjaev.arслан@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31.04.2024. После доработки 01.06.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Проблема изменения, а особенно ухудшения качества воды функционирующих водохранилищ, крайне актуальна в настоящее время. В аридных районах возможность использования водохранилищ лимитируется возрастанием минерализации, но этот вопрос практически не изучен и не освещен в научной литературе. Результаты, изложенные в данной статье, оригинальны и впервые характеризуют особенности количественных изменений пространственной и сезонной трансформации минерализации воды водохранилищ аридных районов в течение длительного периода функционирования. Данные получены в результате многолетних наблюдений за период весна-осень с 2001 по 2023 гг. на 5 водохранилищах, имеющих разное назначение и водный режим и расположенных на юге степной зоны и на севере пустынной зоны в Республике Калмыкия.

На всех водохранилищах минерализация воды оказалась выше питающих их вод. На водохранилищах Красинское и Чограйское, используемых для питьевого водоснабжения и наполняемых привлеченными речными водами из крупных рек других регионов (Волга, Терек, Кума), среднее значение минерализации воды в весенний и осенний сезоны было минимальным (0.5 и 0.8 г/дм<sup>3</sup>; 1.6 и 2.0 г/дм<sup>3</sup> соответственно) в сравнении с другими водохранилищами. Наиболее высокой минерализация воды была на водохранилищах Цаган-Нур и Деед-Хулсун (5.8 и 32.0 г/дм<sup>3</sup>; 9.1 и 12.9 г/дм<sup>3</sup> соответственно), служащих накопителями вод дренажно-сбросного стока Сарпинской и Черноземельской обводнительно-оросительных систем. На водохранилище Аршань-Зельмень, созданном для орошения и образованном водами местного речного стока (2.9 г/дм<sup>3</sup>) и родниками (0.4 г/дм<sup>3</sup>), значение средней минерализацией за весь период наблюдений составило 5.3 и 19 г/дм<sup>3</sup> в весенний и осенний сезоны.

Установлено, что минерализация воды водохранилищ на привлеченном стоке географически не детерминирована. На водохранилищах, расположенных в пустынной зоне (Красинское и Деед-Хулсун), значение минерализации оказалось ниже воды водохранилищ, расположенных в степной зоне и имеющих аналогичное назначение (Чограйское и Цаган-Нур). *Сезонная изменчивость* минерализации воды всех водохранилищ имеет сходство в том, что в осенний период значения выше, чем в весенний. Минимальные изменения отмечены на водохранилищах питьевого назначения (Красинское и Чограйское). *Пространственная изменчивость* минерализации на разных участках водохранилищ связана с тем, что вновь поступающие воды имеют минерализацию ниже, чем в водохранилище. Различия в значениях минерализации воды между разными участками одного водохранилища и по сезонам тем меньше, чем ниже значение минерализации его вод. На Красинском и Чограйском она не превышает 0.3 г/дм<sup>3</sup>, на Цаган-Нуре, водохранилище с самой высокой минерализацией, в весенний период она составляет 7.9-8.7 г/дм<sup>3</sup>, в осенний – 24.9-26.2 г/дм<sup>3</sup>. Для питьевого водоснабжения и орошения, исходя из среднесезонных значений минерализации воды, может использоваться только вода Красинского водохранилища. Вода Чограйского

водохранилища, предназначенная для питьевого водоснабжения и орошения, исходя из современного значения минерализации около  $2 \text{ г/дм}^3$ , может быть использована только для рыболовства и водопоя скота разных категорий.

*Ключевые слова:* водохранилище, минерализация воды, пространственно-временные изменения, приплотинный, средний и привершинный участки.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-151-162**

**EDN: HENTNP**

Создание и функционирование водохранилищ в мире обусловило много системных экологических проблем (Авакян, 1982; Авакян, Лебедева, 2002; Кочарян, Лебедева, 2014; Данилов-Данильян и др., 2023), вплоть до того, что даже обсуждалась проблема их спуска (Коронкевич и др., 1995). В аридных районах водохранилища – это неперенный элемент водохозяйственных систем. Они решают проблему дефицита атмосферного увлажнения и поверхностного стока, но в то же время создают свои специфические проблемы. Одна из них – проблема качества воды функционирующих водохранилищ. В последние годы эта проблема становится наиболее обсуждаемой и актуальной. Для аридных районов проблема качества воды водохранилищ в первую очередь сталкивается с возрастанием минерализации воды в них, но этот вопрос практически не изучен и слабо освещен в научной литературе (Авакян, Лебедева, 2002; Данилов-Данильян, Хранович, 2010; Коронкевич и др., 2022). Научные публикации по этой теме единичны (Матарзин, 1983; Уланова, 2010; Сангаджиев, Онкаев, 2012; Овчинников и др., 2015). Сведения о пространственно-временных изменениях минерализации их вод практически отсутствуют.

В отношении природных вод известно, что и химизм, и величина их минерализации географически детерминированы. Прежде всего, в соответствии с учением о гидрохимии природных вод О.А. Алёкина (1970), их ионный состав изменяется от гидрокарбонатно-кальциевого в лесной зоне до сульфатно-натриевого и хлоридно-натриевого на юге степной зоны и в пустынях. Между химизмом и минерализацией имеется зависимость: гидрокарбонатный состав ионов преобладает при минерализации до  $1 \text{ г/дм}^3$ ; при минерализации  $1-3 \text{ г/дм}^3$  преобладают сульфаты; выше – сульфаты и хлориды. Катионы кальция доминируют при минерализации вод  $0-2 \text{ г/дм}^3$ ; выше – ионы Na.

Все природные воды в зависимости от значения минерализации делятся на пресные (до  $1 \text{ г/дм}^3$ ), солоноватые ( $1.0-24.7 \text{ г/дм}^3$ ), соляные или минеральные ( $24.7-47 \text{ г/дм}^3$ ) и рассолы (более  $47 \text{ г/дм}^3$ ). Пресные воды, в свою очередь, подразделяются на воды с малой (до  $0.2 \text{ г/дм}^3$ ), средней ( $0.2-0.5 \text{ г/дм}^3$ ) и повышенной (более  $0.5 \text{ г/дм}^3$ ) минерализацией. В водном хозяйстве используются пресные и солоноватые воды (Алекин, 1970).

На сегодняшний день благодаря работам, посвященным изучению функционирования водохранилищ (Авакян, 1982; Авакян и др., 1987; Коронкевич и др., 2022; Новикова, Назаренко, 2013; Эдельштейн, 1998; Starodubtsev et al., 2004), известно, что минерализация и химический состав их вод, как и природных, зонально обусловлены, формируются и изменяются в результате воздействия комплекса природных и антропогенных факторов. В работе Н.М. Новиковой и О.Г. Назаренко (2013) было показано, что в степной зоне с севера на юг, вслед за изменением зональных особенностей среды и заглупления грунтовых вод, происходит возрастание минерализации воды водохранилищ и подземных вод на прибрежных участках под их влиянием; химический состав с гидрокарбонатно-сульфатного сменяется на сульфатно-хлоридный, возрастает рН. Благодаря замедленному водообмену на фоне географической зональности в химическом составе водохранилищ проявляется влияние местных азональных факторов (геологического строения, рельефа), приводящее к неоднородности вод внутри каждого района и в каждом водоеме.

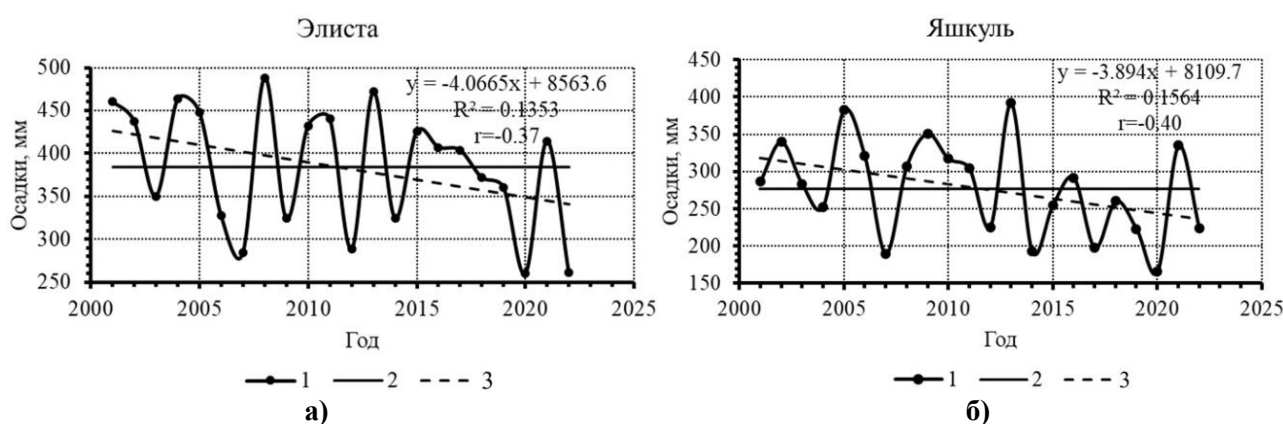
Проблема изучения изменения минерализации воды водохранилищ, в особенности ее эколого-географический аспект в аридных районах, до сих пор, безусловно, актуальны в связи с их высокой хозяйственной значимостью. Поэтому цель данного исследования – изучение пространственно-временного изменения минерализации воды водохранилищ, имеющих разное назначение и водный режим в условиях аридных территорий, и оценка по этим показателям возможности их использования для решения задач основных видов водопользования (питьевого водоснабжения, водопоя скота, орошения и пр.).

### Материалы и методы

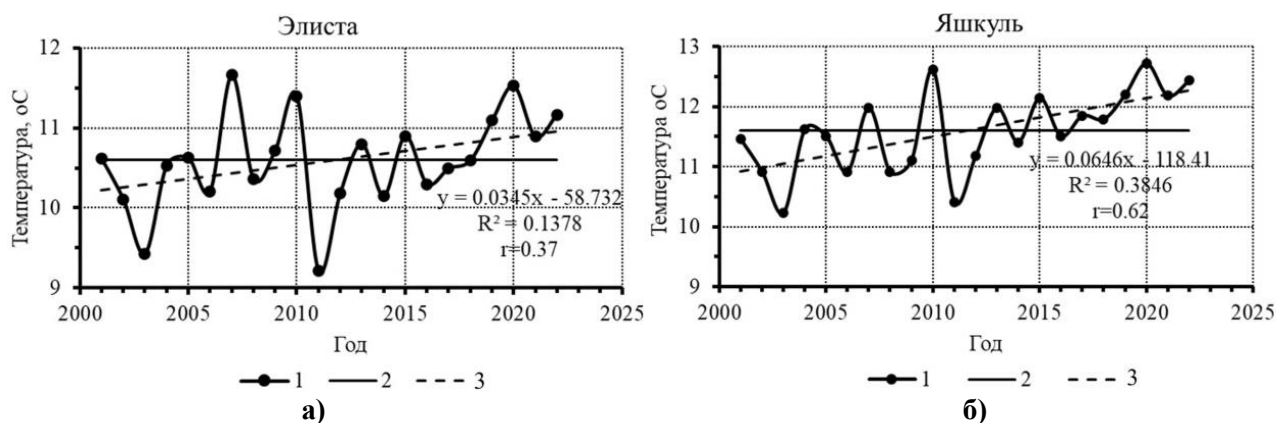
*Район работ и объекты исследования.* Территория Калмыкии, на которой проводились исследования, располагается в степной и пустынной зонах. Особенности климата степной зоны характеризуют данные метеостанции в г. Элиста, пустынной зоны – метеостанции в г. Яшкуль.

Средние многолетние значения температуры и осадков за два последних базовых климатических периода вместе (1991-2020 гг.) составляют в г. Элисте 10.2°C и 385.3 мм; в Яшкуле – 11.2°C и 281.6 мм. Для гидроклиматических условий территории обеих зон характерны периоды повышенной и пониженной водности.

Экспериментальные исследования на водоемах проводились в период 2001-2023 гг., однако для анализа удалось привлечь данные только по 2022 г. включительно, поскольку официальные данные за 2023 г. пока отсутствуют на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации. Период 2001-2022 гг. далее при анализе климатических параметров называется «периодом наблюдений». Анализ значений температуры и осадков за этот период показал, что они имели разнонаправленное изменение, но сходное на обеих метеостанциях (рис. 1, 2).



**Рис. 1.** Годовые суммы осадков в степной (А) и пустынной (Б) зонах в период проведения наблюдений. Условные обозначения: 1 – годовая сумма осадков, 2 – среднее значение годовых сумм осадков за период 2001-2022 гг., 3 – линейный тренд.



**Рис. 2.** Температура воздуха (°C) в степной (а) и пустынной (б) зонах в период проведения наблюдений. Условные обозначения: 1 – годовая сумма осадков, 2 – среднее значение годовых сумм осадков за период 2001-2022 гг., 3 – линейный тренд.

Среднее многолетнее значение осадков в период наблюдений на обеих станциях было выше, чем за два последних климатических периода вместе (1961-2020 гг.) – 381.8 мм против 364.7 мм в степной зоне (Элиста), 277 мм против 262.9 мм в пустынной (Яшкуль). Изменение осадков

за период наблюдений соответствовало статистически значимому отрицательному линейному тренду (рис. 1) для обеих метеостанций: в Элисте при  $r = -0.37$  и  $n = 22$ , в Яшкулье при  $r = -0.40$  и  $n = 22$  вероятность  $P = 1 - \alpha = 0.9$ ). В период наблюдений годовые суммы осадков были ниже среднеголетних значений все последние пять лет с 2018 г., кроме 2021 г.

Среднее значение температуры воздуха, как и осадков, за период наблюдений на обеих станциях было выше, чем за два последних климатических периода вместе (19961-2020 гг.) –  $10.6^{\circ}\text{C}$  против  $9.7^{\circ}\text{C}$  в степной зоне (Элиста),  $11.6^{\circ}\text{C}$  против  $10.8^{\circ}\text{C}$  в пустынной (Яшкуль). Изменение температуры соответствовало положительному статистически значимому линейному тренду (рис. 2) на обеих метеостанциях (с выборкой в 22 года в Элисте при  $r = 0.37$  вероятность  $P = 1 - \alpha = 0.9$ , в Яшкулье при  $r = 0.62$  вероятность  $P = 1 - \alpha = 0.99$ ). В последние пять лет годовые значения температуры воздуха были выше среднеголетних значений.

Отмеченное достоверное снижение осадков и увеличение температуры воздуха от начала к концу периода наблюдений (2001-2022 гг.) как в степной, так и в пустынной части Калмыкии можно оценить как ухудшение условий влагообеспеченности территории, что способствует сокращению водности и повышению минерализации местных вод.

В условиях дефицита водных ресурсов, обусловленных климатическими условиями, на территории Республики Калмыкия гидрографическая сеть представлена небольшими реками с непостоянным стоком и природными водоемами с высокой минерализацией. Обширный участок Прикаспийской низменности на СВ в степной и пустынной зонах представляет собой бессточную область (рис. 3), лишенную водотоков.

Вблизи административной границы Калмыкии с СЗ на ЮВ транзитом протекает и на небольшом участке заходит в страну река Волга, на ЮЮВ – граница с Республикой Дагестан проходит по реке Кума до впадения ее в Каспийское море. На ЮВ территория выходит к Каспийскому морю. Для ведения сельского хозяйства в разное время в республике были созданы обводнительно-оросительные системы (ООС), базовыми элементами которых являются водохранилища.

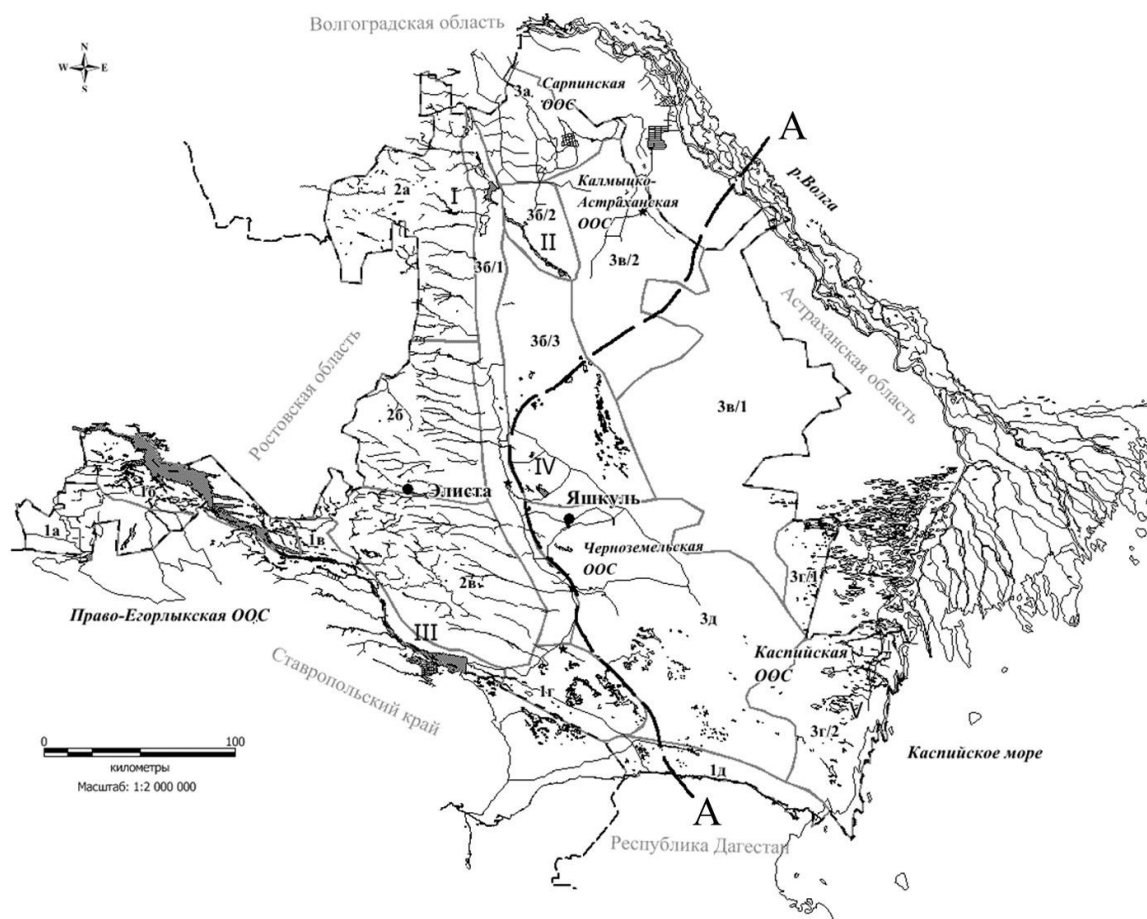
В качестве объекта исследований выбраны пять наиболее значимых в водном хозяйстве республики водохранилищ, отличающихся друг от друга по размерам, режиму, назначению, зональной и ландшафтной приуроченности, максимально представляющие разнообразие их назначения и водного режима (рис. 3).

В условиях южной (опустыненной) степи располагаются водохранилища Аршань-Зельмень – на восточном склоне возвышенности Ергени; Цаган-Нур – на Прикаспийской низменности; Чограйское – в Кумо-Маньчской впадине; в условиях северной пустыни это Деед-Хулсун – на Прикаспийской низменности и Красинское – в дельте Волги (рис. 3). В соответствии с классификацией водохранилищ по размерам площади водной поверхности (Авакян, Шарапов, 1977), в условиях максимального наполнения Красинское относится к малым, Аршань-Зельмень, Деед-Хулсун – к небольшим, а Цаган-Нур, Чограйское – к средним.

Водоохранилища Аршань-Зельмень и Чограйское созданы как базовые для орошаемого земледелия. Воды последнего используются Черноземельской ООС, идут на водоснабжение г. Элисты и другие цели. Водоохранилища Цаган-Нур и Деед-Хулсун – приемники и накопители дренажно-сбросных вод Сарпинской и Черноземельской ООС. Красинское водохранилище создано для обеспечения питьевого водоснабжения г. Лагань.

В условиях дефицита вод поверхностного стока только водохранилище Аршань-Зельмень, располагающееся в степной зоне, наполняется водами местного речного и подземного стока, поступающего с возвышенности Ергени (рис. 3, табл. 1). Остальные водохранилища наполняются помимо вод местного речного стока еще водами рек, располагающихся за пределами Калмыкии (Чограйское), и сбросными и дренажными водами (Деед-Хулсун) обводнительно-оросительных систем. Есть водохранилища, полностью использующие только воды привлеченного речного стока (Красинское) и дренажно-сбросные воды ООС (Цаган-Нур; табл. 1).

Основным источником информации о минерализации воды исследуемых водохранилищ послужили данные полевых исследований, которые проводились в весенние (апрель-май) и осенние (сентябрь-октябрь) сезоны с 2001 по 2023 гг. Они включали отбор проб воды из водоемов на одних и тех же ключевых участках, расположенных в приплотинной, центральной частях и в зоне выклинивания подпора.



**Рис. 3.** Расположение исследованных водохранилищ на совмещенной Схеме природного районирования (Борликов, 2001) и гидрографической сети республики Калмыкия (Уланова, 2010). Условные обозначения: А-А – граница степи и пустыни. Водохранилища: I – Аршань-Зельмень, II – Цаган-Нур, III – Чограйское, IV – Деед-Хулсун, V – Красинское. Ландшафтные районы: 1а – Северо-Ставропольский, 1б – Западно-Маньчский, 1в – Восточно-Маньчский, 1г – Состинский, 1д – Прикумский, 2а – Североергенинский, 2б – Среднеергенинский, 2в – Южноергенинский, 3а – Волго-Сарпинский, 3б/1 – Приергенинский, 3б/2 – Сарпинский, 3б/3 – Даванский, 3в/1 – Приволжский восточный, 3в/2 – Приволжский западный, 3г/1 – Приволжский, 3г/2 – Приморский, 3д – Черноземельский.

**Таблица 1.** Типы водохранилищ по размерам и водному питанию.

Размер водохранилища (полный объем, км <sup>3</sup> )	Источник питания				
	Местный речной и поверхностный сток	Смешанное питание: местный речной и поверхностный сток +		Привлеченный сток: привлеченный речной сток р. Волги +	
		привлеченный речной сток Кубани и Терека	сбросные и дренажные воды Черноземельской ООС	сбросные и дренажные воды Сарпинской ООС	нагонные воды Каспия
Среднее (1-0.1)	–	Чограйское		Цаган-Нур	–
Небольшое (0.1-0.01)	Аршань-Зельмень	–	Деед-Хулсун	–	–
Малое (менее 0.001)	–	–	–	–	Красинское

Следует отметить, что в данной работе под термином *минерализация* понимается сумма солей основных ионов, т.к. в отобранных из водохранилищ пробах воды в сертифицированных гидрохимических лабораториях определялись ионный состав и сумма солей, которая и принималась за минерализацию. С 2001 по 2019 гг. анализ проб воды на минерализацию и химизм выполнялся в Калмыцком филиале ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии им. А.Н. Костякова (г. Элиста) в соответствии со стандартом ГОСТ 26449.1-85 (1985): катионно-анионный состав – титриметрическим методом, определение сухого остатка – гравиметрическим, определение pH – потенциометрическим. Анализы выполнялись по pH и содержанию основных ионов:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . С 2019 по 2023 гг. анализы проб, отобранных из водохранилищ по этим же показателям, выполнялись в лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия (г. Волгоград) в соответствии с принятыми ГОСТами и нормативными документами.

По результатам многолетних наблюдений была создана База Данных, сопряженная на основе ГИС-технологий с картографическими материалами. Она включает количественную информацию о минерализации и химизме проб воды, полученную с помощью полевых и лабораторных исследований в одних и тех же точках на ключевых водоемах, а также количественные данные, полученные из литературных источников о минерализации воды источников привлеченного стока, питающих водохранилища. База данных содержит результаты анализов 230 проб поверхностных вод, отобранных на ключевых водоемах с 2001 по 2023 гг.

Накопленные в Базе количественные значения минерализации воды послужили основой для выявления в каждом водоеме среднемноголетних, абсолютных максимальных и минимальных значений минерализации, сезонных (весна и осень) и пространственных изменений значений внутри водоемов (приплотинная, средняя и привершинная). Помимо того, проведено сравнение значения минерализации водохранилищ разного назначения с минерализацией питающих их вод.

Оценка возможности использования воды в водном хозяйстве проводилась на основании критерия предельно допустимых значений минерализации воды для использования в разных хозяйственных целях, разработанных инжиниринговой компанией «Унивод» и представленных на их сайте (Показатели минерализации ..., 2024).

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных данных наблюдений по минерализации воды исследуемых водохранилищ показал, все они сходны друг с другом в том, что значения минерализации их воды в точках наблюдений нестабильны и за период наблюдений изменяются в широком диапазоне значений, а на отдельных водохранилищах в соседние годы могут отличаться на порядок. Поэтому при анализе в качестве показателей используются преимущественно средние данные за период наблюдений и абсолютные минимальные и абсолютные максимальные значения.

*Средние значения минерализации воды водохранилищ.* В связи с тем, что режимные наблюдения за минерализацией воды отсутствуют, а в данном исследовании пробы отбирались в весенний и осенний периоды, данные по минерализации представляют не средние значения за год, а только за указанные периоды (табл. 2). За весь срок наблюдений наименьшие средние значения минерализации воды как весной, так и осенью, были отмечены на водохранилищах, имеющих питьевое назначение Красинском и Чограйском (0.55-0.8 и 1.6-2.0 г/дм<sup>3</sup> соответственно), наибольшие – на водохранилищах, принимающих воды коллекторно-дренажного стока, т.е. на Деед-Хулсуне и Цаган-Нуре (9.1-12.9 и 18.7-32.0 г/дм<sup>3</sup> соответственно). На Аршань-Зельмене, имеющем ирригационное назначение, минерализация воды имеет промежуточное значение (6.2-19.0 г/дм<sup>3</sup>). Как видно, минерализация воды водохранилищ на привлеченном стоке географически не детерминирована. На водохранилищах, расположенных в пустынной зоне (Красинское и Деед-Хулсун) значение минерализации оказалось ниже воды водохранилищ, расположенных в степной зоне и имеющих аналогичное назначение (Чограйское и Цаган-Нур).

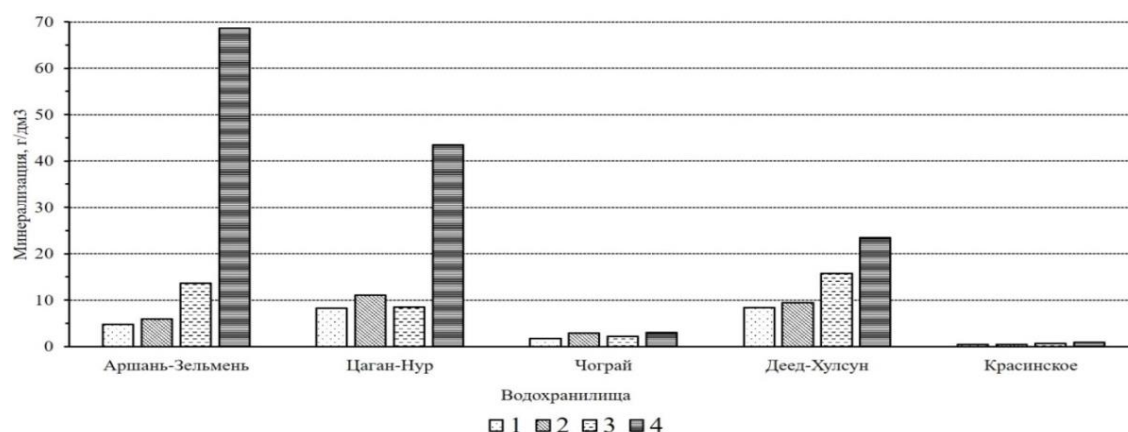
Чтобы показать различие минерализации воды водохранилищ в начале и конце периода наблюдений, были выбраны значения за конкретные годы: за 2012 г. – когда среднегодовые суммы осадков в два предыдущие года в Элисте и четыре предыдущих года в Яшкуле были выше среднего значения осадков за период наблюдений и отмечалось максимальное наполнение водохранилищ,

за 2022 г. – когда среднегодовые суммы осадков в два предыдущих года в Элисте и три предыдущих года в Яшкуле были ниже среднего значения осадков за период наблюдений и наполнение водохранилищ было минимальным за весь период наблюдений (рис. 4). На водохранилищах питьевого назначения (Чограйское и Красинское), наполняемых водами привлеченного речного стока, значения минерализации отличались не более чем на 0.5 г/дм<sup>3</sup>. На водохранилищах-коллекторах сбросных и дренажных вод наиболее значительные отличия были в осенний период и достигали 14 и 32 г/дм<sup>3</sup> на Деед-Хулсуне и Цаган-Нуре соответственно. Однако наиболее значительные отличия произошли на Аршань-Зельмене, питающимся водами местного речного стока, и составили 8.9 и 62.7 г/дм<sup>3</sup>. В 2022 г. площадь водохранилища сократилась до минимального размера со времени его создания.

**Таблица 2.** Средние многолетние, абсолютные минимальные и максимальные значения минерализации воды водохранилищ в весенний и осенний сезоны за период 2001-2023 гг., г/дм<sup>3</sup>.

Водохранилище	Весна			Осень			Разница осени и весны		
	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.
Аршань-Зельмень – 1*	6.2	2.63	13.57	19.0	3.6	68.62	1.7	0.97	55.05
Аршань-Зельмень – 3	5.3	2.92	10.41	13.9	3.27	46.23	2.6	0.35	35.82
Цаган-Нур – 1	18.7	7.14	70.24	32.0	9.65	73.18	4.6	2.51	2.94
Цаган-Нур – 2	10.8	7.03	13.42	7.1	2.25	14.05	11.8	-4.78	0.63
Цаган-Нур – 3	10.0	8.94	11.08	5.8	5.75	5.85	12.1	-3.19	-5.23
Деед-Хулсун – 1	9.1	2.23	15.73	12.9	8.7	23.6	-4.2	6.47	7.87
Деед-Хулсун – 3	11.3	9.17	18.29	12.4	9.4	22.78	8.9	0.23	4.49
Чограйское – 1	1.6	1.23	2.01	2.0	1.3	2.96	1.2	0.07	0.95
Чограйское – 2	1.9	1.6	2.25	1.8	1.31	2.49	1.9	-0.29	0.24
Красинское – 1	0.5	0.28	0.63	0.6	0.28	0.84	0.3	0	0.21
Красинское – 2	0.5	0.43	0.68	0.8	0.43	1.51	0.4	0	0.83

**Примечание к таблице 2:** \* – цифры у названия водохранилища обозначают участки, на которых отбирались пробы (1 – приплотинный, 2 – средний, 3 – верхний или зона выклинивания подпора).



**Рис. 4.** Минерализация воды водохранилищ в начале и конце периода наблюдений. Условные обозначения: 1 – осенние значения в 2012 г., 2 – весенние значения в 2012 г., 3 – весенние значения в 2022 г., 4 – осенние значения в 2022 г.

*Сезонные изменения минерализации.* Полученные данные показывают (табл. 2), что средние значения за период наблюдений весеннего периода на водохранилищах ниже осенних. Весной средние значения минерализации за период изменяются в широком диапазоне – от 0.6 г/дм<sup>3</sup> на Красинском водохранилище до 18.7 г/дм<sup>3</sup> в приплотинной части Цаган-Нура. Средние за период

наблюдений осенние значения имеют более широкий диапазон значений – от 0.6 г/дм<sup>3</sup> в приплотинной части Красинского водохранилища до 32.0 г/дм<sup>3</sup> в приплотинной части Цаган-Нура.

Наименьшие отличия минерализации между разными сезонами года за весь период наблюдений характерны (табл. 2) для Красинского водохранилища – 0.3-0.4 г/дм<sup>3</sup>, на Чограйском они более существенны – 1.2-1.9 г/дм<sup>3</sup>. Аршань-Зельмень занимает промежуточное положение – 1.7-2.6 г/дм<sup>3</sup>. Самые высокие различия осенних и весенних значений оказались на Дее-Хулсуне и Цаган-Нуре – 4.2-8.9 и 4.6-12.1 г/дм<sup>3</sup> соответственно.

*Абсолютные минимальные значения* весеннего периода изменяются от 0.28 г/дм<sup>3</sup> в приплотинной части Красинского водохранилища до 7.14 г/дм<sup>3</sup> в приплотинной части Цаган-Нура и незначительно отличаются от значений осеннего периода: от 0.28 г/дм<sup>3</sup> в приплотинной части Красинского водохранилища до 9.65 г/дм<sup>3</sup> в приплотинной части Цаган-Нура (табл. 2).

*Абсолютные максимальные значения* минерализации воды на большинстве участков водохранилищ выше в осенний период, чем в весенний (табл. 2). Они превышают средние значения осенью тем меньше, чем ниже минерализация воды водоема – так же, как и весной. Самые низкие значения из абсолютных максимальных как весной, так и осенью (0.63 и 0.84 г/дм<sup>3</sup> соответственно) отмечены в приплотинной части Красинского водохранилища, имеющего минимальную минерализацию, а самые высокие (70.24 и 73.18 г/дм<sup>3</sup>) – в приплотинной части Цаган-Нура, имеющего максимальную минерализацию. Наибольшая разница абсолютных максимальных значений в разные сезоны года отмечена на водохранилище Аршань-Зельмень, где она составляет от 35 до 55 г/дм<sup>3</sup> и в 4-7 раз превышает соответствующие значения на других водохранилищах.

Рассмотренные данные позволяют сделать вывод о том, что на водохранилищах питьевого назначения разница между средними значениями минерализации воды за весенний и осенний сезоны и между значениями в начале и конце наблюдений изменяются в пределах 0.5-2 г/дм<sup>3</sup>, в то время как на водохранилищах-накопителях сбросных вод с орошаемых земель различия аналогичных показателей за сезон составляют 4.2-12.1 г/дм<sup>3</sup>, а в осенний сезон во второй половине периода наблюдений достигают очень высоких значений, превышающих весенние значения в 4-7 раз. Сравнение средних за период наблюдений значений минерализации за осенний и весенний сезоны на водохранилище Аршань-Зельмень обнаруживает невысокие значения различий (1.7-2.6 г/дм<sup>3</sup>), близкие Чограйскому. Однако это водохранилище оказалось очень чувствительным к сокращению атмосферного увлажнения, и к концу периода наблюдений его вода достигла минерализации рассолов (68.3 г/дм<sup>3</sup>).

*Минерализация воды в разных частях одного водохранилища.* Анализ данных (табл. 2, 3) показал, что весной на Деед-Хулсуне, Чограйском и Красинском водохранилищах минерализация воды за весь период наблюдений на приплотинном участке ниже, чем в средней части водохранилища, т.к. поступление воды идет у плотины. Осенью на первых двух водохранилищах минерализация воды на приплотинном участке становится незначительно выше, чем в средней части, а на Красинском она по-прежнему остается ниже. На Аршань-Зельмене и Цаган-Нуре минерализация воды весной и осенью у плотины выше, т.к. поступление воды идет в верхней части водохранилищ. Самые высокие различия в минерализации воды между участками характерны для водохранилища Цаган-Нур. Здесь на приплотинном участке осенью минерализация выше, чем в средней части на 24.9 г/дм<sup>3</sup> и в привершинной части – на 26.2 г/дм<sup>3</sup>, весной эти различия ниже и составляют 7.9 и 8.7 г/дм<sup>3</sup> соответственно. На Цаган-Нуре так же высоки различия абсолютных максимальных значений минерализации на разных участках. В весенний период разница значений между абсолютными значениями на приплотинном и среднем участках достигла 56.8 г/дм<sup>3</sup>, а между приплотинным и привершинным – 59.2 г/дм<sup>3</sup>, в осенний – 59.1 и 67.3 г/дм<sup>3</sup>. Получается, различие абсолютных значений минерализации между приплотинным и другими участками этого водохранилища так же высоко, как и при сравнении с максимальными значениями на других водохранилищах. Однако следует учесть, что абсолютные значения – это разовые события.

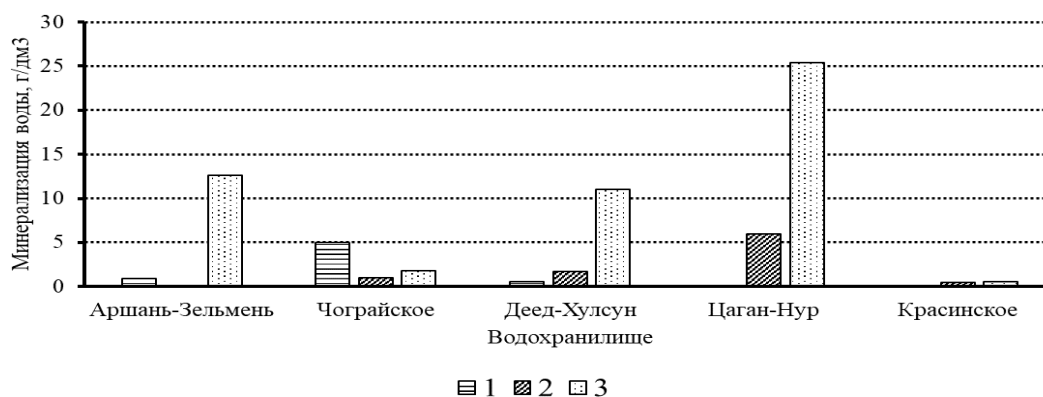
Рассмотренные данные позволяют сделать вывод о том, что для большинства водоемов характерно не только увеличение минерализации от весны к осени, но и от места поступления вод – к месту выклинивания подпора. Минерализация воды в разных частях одного водохранилища отличается менее существенно, чем значения минерализации между водохранилищами разного назначения, а разница значений тем меньше, чем ниже минерализация воды этого водохранилища.

Минерализация воды водохранилищ, как известно из литературных источников (Новикова, Назаренко, 2013; Овчинников и др., 2015), выше минерализации питающих их вод местного стока. В данной работе впервые обращено внимание и получены количественные данные о минерализации воды водохранилищ, наполняемых водами привлеченного стока (рис. 5).

**Таблица 3.** Разница средних многолетних, абсолютных минимальных и максимальных значений минерализации воды между разными участками одного водохранилища в разные сезоны, г/дм<sup>3</sup>.

Водохранилище, участки	Весна			Осень		
	средн. мн.	абс. мин.	абс. макс.	средн. мн.	абс. мин.	абс. макс.
Аршань-Зельмень – 1 и 3*	1.0	-0.3	3.2	5.1	0.3	22.4
Цаган-Нур – 1 и 2	7.9	0.1	56.8	24.9	7.4	59.1
Цаган-Нур – 1 и 3	8.7	-1.8	59.2	26.2	3.9	67.3
Деед-Хулсун – 1 и 2	-2.2**	-6.9	-2.6	0.5	-0.7	0.8
Чограйское – 1 и 2	-0.3	-0.4	-0.2	0.2	0.0	0.5
Красинское – 1 и 2	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.7

**Примечания к таблице 3:** \* – цифры обозначают участки водохранилища, между которыми рассматривается разница значений минерализации (1 – приплотинный, 2 – средний, 3 – верхний или зона выклинивания подпора); \*\* – отрицательные значения обозначают, на сколько значения минерализации воды в средней части выше, чем в приплотинном.



**Рис. 5.** Минерализация воды водохранилищ и питающих их вод. Условные обозначения: 1 – воды местного речного стока, 2 – воды привлеченного стока, 3 – среднее значение минерализации воды водохранилища за период наблюдений (2001-2022 гг.).

*Водохранилище Аршань-Зельмень* – небольшой балочный водоем, приуроченный к восточному склону Ергенинской возвышенности, спускающемуся на Сарпинскую низменность. В 1937 г. на водоеме была создана земляная плотина, в настоящее время по ней проходит автодорога Элиста-Волгоград. Питание водохранилища – атмосферное, а также за счет грунтовых вод и двух основных притоков – рек Аршань-Зельмень и Хамхурка, расположенных в привершинной части водоема и начинающихся из родников. Водохранилище создавалось для нужд регулярного орошения на площади до 1.2 тыс. га, однако в начале 1990-х гг. оросительная система прекратила свое существование ввиду повышения минерализации. Водохранилище имеет многолетнее регулирование. Минерализация воды рек, питающих это водохранилище, изменяется от 0.4 до 2.6 г/дм<sup>3</sup> с рН = 8.6 и родники с минерализацией воды 0.9 г/дм<sup>3</sup> и рН = 8.4. Минерализация воды этого водохранилища со времени его создания постепенно увеличивается от 2.4 г/дм<sup>3</sup> в 1980-х гг. до 4.2 г/дм<sup>3</sup> к началу наблюдений. В 2001-2017 гг. в период наблюдений среднее значение минерализации было в половину ниже, чем за весь период и изменялось от 4 г/дм<sup>3</sup> весной до 7 г/дм<sup>3</sup> осенью.

*Водохранилище Цаган-Нур* располагается прарусле р. Волги. Ранее оно имело двойное назначение. В ранневесенний период принимало воду по каналу Р-1 из Волги с низким уровнем

минерализации до  $0.7 \text{ г/дм}^3$  и химическим составом, изменяющемся от гидрокарбонатно-кальциевого до сульфатно-кальциево-натриевого, при  $\text{pH} = 8.0-8.3$ . Затем эта вода использовалась на орошение, а затем становилось накопителем сбросных и дренажных вод с орошаемых полей Сарпинской ООС. В последние годы вода из р. Волги не поступает, и в водохранилище сбрасываются воды с минерализацией  $0.6-1.7 \text{ г/дм}^3$ , хлоридно-натриевым химическим составом весной и до  $6.0 \text{ г/дм}^3$  после вегетации близкого химизма (Овчинников и др., 2015). Среднее значение за период наблюдений минерализации воды водоема существенно выше поступающих вод и изменялось с  $18.7 \text{ г/дм}^3$  весной до  $32.0 \text{ г/дм}^3$  осенью.

*Водоохранилище Деед-Хулсун* располагается в устье р. Яшкуль, питается ее водами, но преимущественно пополняется сбросными и дренажными водами Черноземельской ООС, использующей воду Чограйского водохранилища. Минерализация сбросных вод колеблется от  $1.2$  до  $1.8 \text{ г/дм}^3$  сульфатно-хлоридного и хлоридно-сульфатно-натриевого химизма,  $\text{pH} = 7.8-8.2$  (Овчинников и др., 2015). Среднее значение за период наблюдений минерализации воды в период наблюдений было существенно выше и изменялось от  $9.1 \text{ г/дм}^3$  весной до  $12.9 \text{ г/дм}^3$  осенью.

*Чограйское водохранилище*, созданное в долине р. Восточный Маныч, наполняется водами местных водотоков с минерализацией воды  $5 \text{ г/дм}^3$ , но основной объем составляют воды привлеченного стока рек Терек и Кума с минерализацией воды около  $1 \text{ г/дм}^3$  (Овчинников и др., 2015). Из Чограйского водохранилища в г. Элисту по каналу подается вода для питьевых целей и идет на орошение Черноземельской ООС и используется на другие нужды. После создания водохранилища и по 2004 г. минерализация воды водоема была  $1.1-1.4 \text{ г/дм}^3$ . С 2007 г. минерализация постепенно стала увеличиваться. Среднее значение минерализации воды водохранилища за весь период наблюдений составило весной –  $1.6 \text{ г/дм}^3$ , осенью –  $2.0 \text{ г/дм}^3$ , что выше минерализации наполняющих водохранилище привлеченных вод. Следует отметить, что в то же время минерализация вод Чограйского водохранилища ниже минерализации вод местного речного стока почти в два раза благодаря разбавлению привлеченными водами (рис. 5).

*Красинское водохранилище* наполняется волжской водой с минерализацией не более  $0.5 \text{ г/дм}^3$ , гидрокарбонатно-кальциевым составом и нейтральной реакцией воды. Кроме того, в него периодически во время нагонов поступает вода из Каспийского моря с минерализацией до  $1.5 \text{ г/дм}^3$ , хлоридно-натриевого состава и  $\text{pH} = 7.7$  (Овчинников и др., 2015). Минерализация воды водохранилища в период наблюдений была относительно стабильной и близкой к источнику наполнения –  $0.5-0.6 \text{ г/дм}^3$ .

Рассмотренные данные позволяют сделать вывод о том, что минерализация воды водохранилищ выше наполняющих их вод местного речного стока (Аршань-Зельмень), поступающих сбросных вод с орошаемых земель (Деед-Хулсун и Цаган-Нур) и вод привлеченного речного стока (Чограйское и Красинское).

*Оценка возможности использования воды водохранилищ.* Наименьшую минерализацию по всем показателям имеет Красинское водохранилище питьевого назначения, а наибольшую – водохранилище Цаган-Нур – накопитель сбросных вод (табл. 2, 3). На Красинском водохранилища (табл. 2, 3), средние многолетние значения в весенний и осенний сезоны года соответствуют категории «пресные» (менее  $1 \text{ г/дм}^3$ ), разница между сезонами ниже, чем на других водохранилищах ( $0.3-0.4 \text{ г/дм}^3$ .) Таким образом, вода Красинского водохранилища соответствует его назначению питьевого водоснабжения (табл. 4). И только единичные абсолютные значения осеннего периода могут достигать  $1.5 \text{ г/дм}^3$  и создавать проблему для использования.

Относительно низкие значения минерализации имеет вода Чограйского водохранилища (табл. 2, 3). Среднемноголетние значения в весенний и осенний периоды находятся в последние годы в пределах  $2 \text{ г/дм}^3$ , но эта минерализация превышает допустимый уровень для использования его воды для целей питьевого назначения. Максимальные разовые значения в осенний период превышают среднемноголетние незначительно и приближаются к  $3 \text{ г/дм}^3$ . Разница весенних и осенних среднемноголетних, абсолютных минимальных и максимальных значений выше, чем на Красинском, но также невелика и находится в пределах  $1-2 \text{ г/дм}^3$ . Вода этого водохранилища пригодна для целей рыболовства и водопоя всех категорий скота (табл. 4).

Минерализация воды водохранилища Аршань-Зельмень выше двух предыдущих. При среднемноголетнем значении от  $4 \text{ г/дм}^3$  весной до  $7 \text{ г/дм}^3$  осенью, вода водоема с такой

минерализацией может использоваться для целей рыболовства и водопоя крупного рогатого скота. Но для этого водоема характерно резкое возрастание минерализации в маловодные периоды, что делает использование этого водоема неустойчивым.

Водохранилища Цаган-Нур и Деед-Хулсун встроены в ООС и в последние годы используются в качестве приемных водоемов дренажно-сбросных вод с орошаемых полей. Поэтому среднеемноголетнее значение минерализации их воды очень высоко и не позволяет использовать их для каких-либо других водохозяйственных целей (табл. 4). Однако, несмотря на это, они, как и Аршань-Зельмень, и другие водохранилища Республики Калмыкия, используются для водопоя скота.

**Таблица 4.** Оценка возможности водохозяйственного использования водохранилищ в зависимости от средних многолетних значений минерализации их воды.

Водопользование и водопотребление	Предельно допустимая минерализация воды, г/дм <sup>3</sup> (Унивод)	Водохранилище				
		Аршань- Зельмень	Цаган- Нур	Деед- Хулсун	Чограйское	Красинское
		Минерализация воды водохранилища, г/дм <sup>3</sup> (абс. макс)				
		5.3-19.0 (68.62)	10.8-32 (46.23)	9.1-12.9 (23.6)	1.6-2.0 (2.96)	0.5-0.8 (1.51)
Питьевое водоснабжение	<1	нет	нет	нет	нет	да
Орошение	1.5	нет	нет	нет	нет	да
Рыбоводство	6	нет	нет	нет	да	да
Водопой мелкого рогатого скота	1/5*	нет	нет	нет	нет/да*	да
- молодняка	0.3/3	нет	нет	нет	нет/да	да
Водопой лошадей	0.5/1	нет	нет	нет	нет	да
- молодняка	0.4/0.8	нет	нет	нет	нет	нет/да
Водопой крупного рогатого скота	0.6/1.8	нет	нет	нет	нет	нет/да
- молодняка	0.5/1	нет	нет	нет	нет	нет/да

**Примечание к таблице 4:** \* – в числителе указаны желательные значения, в знаменателе – допустимые.

### Выводы

1. На территории аридных районов Калмыкии функционируют 5 основных типов водохранилищ разного назначения, наполняемых: 1) водами местного речного стока – для орошения; 2) водами местного речного стока и привлеченного стока рек из других регионов – питьевое водоснабжение, орошение и др.; 3) водами местного речного стока и сбросными и дренажными водами оросительно-обводнительных систем – накопители сбросных вод; 4) только водами оросительно-обводнительных систем – накопители сбросных вод; 5) только водами привлеченного речного стока – питьевое водоснабжение. Все водохранилища используются для водопоя скота.

2. Водохранилища, сформированные водами местного речного стока, распространены только в степной зоне, на склонах возвышенности Ергени.

3. Все выделенные типы водохранилищ имеют сходство в том, что значение минерализации их воды нестабильно и в течение периода наблюдений изменялось в широком диапазоне.

4. Значение минерализации воды за весь период наблюдения всех исследованных водохранилищ связано с их водным питанием и использованием. Наименьшие средние значения за период наблюдений весной и осенью имеют водохранилища питьевого назначения, наполняющиеся водами привлеченного речного стока (0.5 г/дм<sup>3</sup> и 2.0 г/дм<sup>3</sup>), наибольшие значения – накопители сбросных и дренажных вод (5.8 г/дм<sup>3</sup> и 32.0 г/дм<sup>3</sup>). Водохранилище Аршань-Зельмень занимает между ними

среднее положение (5.3 г/дм<sup>3</sup> и 19 г/дм<sup>3</sup>). Значение минерализации воды в водохранилищах выше наполняющих их вод. Наименьшие колебания минерализации за период наблюдений характерны для водохранилищ питьевого назначения, наибольшие – для водохранилища, сформированного водами местного речного стока.

5. Минерализация воды водохранилищ, наполняемых водами привлеченного стока, не географически не детерминирована. В пустынной зоне на водохранилищах, имеющих сходное назначение и тип питания, минерализация воды ниже, чем в степной (Красинское и Чограйское; Деед-Хулсун и Цаган-Нур).

6. Для водохранилищ характерно увеличение минерализации от весны к осени, и от места поступления вод – к месту выклинивания подпора.

7. Минерализация воды водохранилищ увеличивается со временем. Современное значение минерализации выше запланированного при их создании, что ограничивает возможность их использования по назначению.

*Финансирование.* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 23-27-10017 Российского научного фонда «Геоэкологическая оценка водных объектов Республики Калмыкия и прилегающих к ним территорий» и госзадания Института водных проблем РАН, тема № FMWZ-2022-0002, государственная регистрация 122041100236-4.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян А.Б. 1982. Водоохранилища и окружающая среда. М.: Наука. 366 с.
- Авакян А.Б., Лебедева И.П. 2002. Водоохранилища XX века как глобальное географическое явление // Известия Российской академии наук. Серия географическая. № 3. С. 13-20.
- Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шаранов В.А. 1987. Водоохранилища. М.: Мысль. 325 с.
- Авакян А.Б., Шаранов В.А. 1977. Водоохранилища гидроэлектростанций СССР. М.: Энергия. 398 с.
- Алёкин О.А. 1970. Основы гидрохимии / Ред. С.В. Бруевич. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 443 с.
- Борликов Г.М. 2001. Природное районирование Российского Прикаспия и перспективы его освоения // Эколого-географический вестник Юга России. № 3-4. С. 33-41.
- ГОСТ 26449.1-85. 1985. Группа Л19. Межгосударственный стандарт. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа соленых вод [Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/1200019501> (дата обращения 07.02.2023)].
- Данилов-Данильян В.И., Новикова Н.М., Назаренко О.Г. 2023. Экологические последствия создания и функционирования водохранилищ в степной зоне // Экосистемы: экология и динамика. Т. 7. № 4. С. 5-28.
- Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. 2010. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Научный мир. 232 с.
- Кочарян А.Г., Лебедева И.П. 2014. Гидроэкология: водохранилища – баланс противоречий // Инженерная экология. № 5. С. 13-31.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. 2022. Вода и человек. М.: Перо. 324 с.
- Коронкевич Н.И., Малик Л.К., Барабанова Е.А. 1995. Прогноз последствий разрушения гидроузлов // Известия РАН. Серия географическая. № 6. С. 39-48.
- Матарзин Ю.М. 1983. Водоохранилища как особые гидрологические объекты // Водные ресурсы. № 6. С. 108-118.
- Новикова Н.М., Назаренко О.Г. 2013. Природные комплексы побережий искусственных водоемов на юге европейской части России // Аридные экосистемы. Т. 19. № 3. С. 35-62. [Novikova N.M., Nazarenko O.G. 2013. Natural complexes of shores of artificial reservoirs in territories of southern part of European Russia // Arid Ecosystems. Vol. 3. No. 3. P. 131-143.]
- Овчинников А.С., Бородычев В.В., Дедова Э.Б., Сазанов М.А. 2015. Мониторинг водных ресурсов Республики Калмыкия и проблемы экосистемного водопользования в агропромышленном комплексе // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее образование. Сельскохозяйственные науки. № 3 (39). С. 9-19.
- Сангаджиев М.М., Онкаев В.А. 2012. Вода Калмыкии – экология и современное состояние // Вестник Калмыцкого университета. № 3 (15). С. 19-25.
- Уланова С.С. 2010. Эколого-географическая оценка искусственных водоёмов Калмыкии и экотонных систем «вода–суша» на их побережьях. М.: РАСХН. 263 с.
- Показатели минерализации и химизма воды, пригодной для отраслей сельского хозяйства. 2024 [Электронный ресурс <https://univod.ru/proizvodstvo/selskoe-hozyajstvo/> (дата обращения 07.02.2023)].
- Эдельштейн К.К. 1998. Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: Геос. 277 с.
- Starodubtsev V.M., Petrenko L.R., Fedorenko O.L. 2004. Dams and Environment: Effects on Soils. Kyiv: Nora-Print. 70 p.

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РЫБОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА НА РЫБ  
ДАГЕСТАНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ**

© 2024 г. И.А. Столбунов\*, С.Н. Салиенко\*\*\*\*, Р.М. Бархалов\*\*\*\*,  
Н.И. Рабазанов\*\*\*\*, М.А. Маммаев\*\*\*\*, И.С. Салиенко\*\*\*\*,  
А.А. Купцов\*\*\*\*, Я.А. Куликова\*\*\*\*, Е.А. Заботкина\*, Е.И. Извеков\*

\*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109. E-mail: sia@ibiw.ru

\*\*Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации

Россия, 413123, Саратовская обл., Энгельсский р-н, пос. Приволжский, ул. Гагарина, д. 1

E-mail: volzniigim@bk.ru

\*\*\*ООО «Осанна»

Россия, 413123, Саратовская обл., Энгельсский р-н, пос. Приволжский, ул. Гагарина, д. 1

E-mail: osannass@mail.ru

\*\*\*\*Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН

Россия, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 45

E-mail: barkhalov.ruslan@yandex.ru, rnuh@mail.ru

\*\*\*\*Дагестанский государственный университет

Россия, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 43а. E-mail: mr.mammaev05@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.06.2024. После доработки 01.08.2024. Принята к публикации 01.10.2024.

Для охраны рыб от попадания в водозаборные сооружения электрорыбозаградители различных систем уже давно и успешно используются, особенно в условиях, затрудняющих применение других типов рыбозащитных устройств и сооружений. Сильные электрические поля, создаваемые электрорыбозаградителями, могут воздействовать на выживаемость, физиологическое состояние и уровень травматизма молоди и взрослых рыб. При этом чувствительность рыб к таким воздействиям во многом определяется их размером. В этой связи выполнены комплексные исследования по оценке биологической безопасности электрических полей системы электронной программируемой (СЭПРО) комплексного рыбозащитного устройства электрического воздействия (КРУЭВ) на массовые виды рыб прибрежной зоны Каспийского моря и отдельных устьевых участков его рек-притоков. Проведено тестирование поведения и распределения рыб разных размерных групп (молодь, взрослые особи) при разных уровнях электрического воздействия рыбозаградителя. Выполнена оценка выживаемости и травматизма рыб при продолжительном максимальном значении напряжения электрорыбозаградителя. В результате проведенных экспериментальных работ установлены режимы и параметры электрорыбозаградителя (СЭПРО КРУЭВ), вызывающие у рыб эффективную поведенческую реакцию избегания. Достоверные различия в выживаемости особей из интактной (контрольной) и подвергнутой электрическому воздействию (экспериментальной) групп рыб не выявлены.

*Ключевые слова:* электрическое воздействие, рыбозащитное устройство, молодь рыб, взрослые (половозрелые) рыбы, распределение и поведение, выживаемость и травматизм.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-163-170**

**EDN: FBUNAO**

Проведенные в последние десятилетия исследования с использованием обширного арсенала методических приемов и тестовых реакций показали, что у рыб, не обладающих специализированными электрорецепторами, способность к восприятию электрических полей оказалась значительно выше, чем это предполагалось ранее. Основным интересом на сегодняшний день представляют изменения в поведении рыб, подвергшихся воздействию электрического поля

заградителя при интенсивностях раздражителя, вызывающих избегание и электрошок. Многие из этих изменений могут носить весьма тонкий характер и служить самостоятельным предметом изучения. Тем не менее для решения вопроса о целесообразности установки определенной системы электрозаградителя в том или ином месте и оценки степени его экологической безопасности необходимо изучить поведенческие реакции рыб, от которых напрямую зависит выживание и благополучие организма.

При изучении возможных последствий воздействия техногенных электрических полей на рыб лабораторными методами практически всегда возникает разрыв между данными эксперимента и реальной ситуацией в природе. Нередко опыты показывают, что в ближней зоне возможны серьезные травмы, связанные с повреждением позвоночника, а также те или иные поведенческие нарушения. От таких ситуаций не застрахована ни одна реальная система электролова или рыбозащиты, если рыба подходит слишком близко к электродам. Анализ последствий электрозаградителя для популяций рыб, обитающих в зоне его установки, представляет собой сложнейшую задачу. В настоящее время в области электролова предпринимаются лишь первые попытки исследования популяционных эффектов (Schill, Beland, 1995; Kocovsky et al., 1997; Ainslie et al., 1998; Nordwall, 1999; Carline, 2001), а в отношении электрорыбозаградителей – это пока белое пятно. В первом приближении проблема может быть решена путем синтеза нескольких массивов данных. Первый компонент – точная карта распределения напряженности электрического поля заградителя. Второй компонент – оценка уровней выживаемости и травмирования рыб в эксперименте с фиксированными значениями напряженности однородного поля на полномасштабном фрагменте защитного шлейфа (Столбунов и др., 2019а, 2019б, 2020, 2022). Третий компонент – видеонаблюдение и/или биотелеметрическое слежение за перемещениями рыб, проходящих через заградитель, а также за трассами следования задержанных рыб, которые приближаются к электродам и поворачивают обратно (это позволит количественно оценить, какая часть особей будет контактировать с электродами и подвергнется воздействию сильного поля).

Исходя из вышесказанного, большое значение имеют комплексные исследования по оценке биологической безопасности электрических полей рыбозащитных устройств для массовых, в том числе промысловых видов рыб.

Цель исследования – оценка влияния электрических полей системы электронной программируемой комплексного рыбозащитного устройства электрического воздействия (СЭПРО КРУЭВ) на массовые виды рыб дагестанского побережья Каспийского моря.

Задачи исследования: анализ поведения и характерных особенностей распределения молоди и взрослых особей массовых видов рыб в зоне действия электрического поля СЭПРО КРУЭВ; оценка выживаемости и травматизма рыб после электрического воздействия СЭПРО КРУЭВ.

### Материалы и методы

Комплексные исследования воздействия электрических полей СЭПРО КРУЭВ (разработчик ООО «ОСАННА», г. Энгельс) на рыб выполняли на базе Аквакомплекса кафедры ихтиологии биологического факультета Дагестанского государственного университета (г. Махачкала) в период с марта по июль 2022 г. Экспериментальные работы проводили на молоди и взрослых особях массовых видов рыб (Бархалов и др., 2012, 2016), отловленных в прибрежной зоне дагестанского побережья Среднего и Южного Каспия, включая устьевые зоны рек Сулак, Кривая балка, Шураозень, Малый Самур и Кейрынчай (Карасау-1).

Сбор ихтиологического материала (март-май, 2022 г.) осуществляли по общепринятым ихтиологическим методикам (Правдин, 1966; Инструкции ..., 2011; Бархалов, 2014). Рыбу для экспериментальных исследований отлавливали с помощью ихтиологического сачка, 6-метровой мальковой волокуши (ячей в крыльях – 6.5 мм, в кутке – газовое сито №7) и вентера (длина крыла 6 м, высота крыла 1.5 м, размер ячей 30 мм). Транспортировку живых рыб из мест отлова осуществляли в пластиковой таре объемом 240 л с принудительной аэрацией (при помощи двух портативных компрессоров «Sunsun JT-202S» с максимальной производительностью 120 л/ч). До начала серий экспериментальных тестирований, пойманную рыбу предварительно выдерживали в двух одинаковых по размерам рыбоводных бассейнах (диаметр – 1.44 м, высота – 0.5 м, объем – 400 л) на базе Аквакомплекса ДГУ.

При видовой идентификации использовали ряд определителей рыб Каспийского моря (Казанчеев, 1981; Богучкая и др., 2013).

*Модельные виды рыб в эксперименте.* Экспериментальные исследования выполнены на молоди и взрослых (половозрелых) особях 10 видов, трех семейств рыб:

I. Семейство Осетровые (Acipenseridae):

1) Стерлядь – *Acipenser ruthenus* Linnaeus, 1758.

II. Семейство Бычковые (Gobiidae):

2) Хвалынский бычок – *Neogobius caspius* (Eichwald, 1831).

III. Семейство Карповые (Cyprinidae):

3) Лещ – *Abramis brama* (Linnaeus, 1758);

4) Золотой карась – *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758);

5) Каспийская шемая – *Chalcalburnus chalcoides* (Güldenstädt, 1772);

6) Терский подуст – *Chondrostoma oxyrhynchum* Kessler, 1877;

7) Кутум – *Rutilus kutum* (Kamensky, 1901);

8) Вобла – *R. caspicus* (Yakovlev, 1870);

9) Чехонь – *Pelecus cultratus* (Linnaeus, 1758);

10) Каспийский рыбец – *Vimba vimba* (Linnaeus, 1758).

В состав экспериментальных выборок рыб входили также особи гибридной формы осетровых видов – ленский осетр (*Acipenser baerii* Brandt, 1869) × русский осетр (*Acipenser gueldenstaedtii* Brandt & Ratzeburg, 1833).

*Тестирование поведенческих реакций рыб на электрическое воздействие СЭПРО КРУЭВ* проводили в экспериментальном бассейне (длина – 300 см, ширина – 150 см, высота – 100 см). Общая площадь бассейна составляла 4.5 м<sup>2</sup>, общий объем – 4.5 м<sup>3</sup>. Период акклимации рыб к условиям эксперимента составлял 30 мин. Серию экспериментов по оценке распределения и поведения рыб в ответ на электрическое воздействие СЭПРО КРУЭВ выполняли в условиях дневной освещенности (>10000 лк) при температуре воды 21–23°C и концентрации кислорода 5–6 мг/л.

Шлейф электродов СЭПРО КРУЭВ был расположен в экспериментальном бассейне. В ходе испытаний опробована конструкция из 5 цилиндрических электродов СЭПРО КРУЭВ. Расстояние между соседними электродами составляло ~30 см. Тестирование распределения и поведения рыб выполняли при разных режимах электрического воздействия СЭПРО КРУЭВ. Серию экспериментов по оценке влияния электрорыбозаградителя на поведение и распределение молоди рыб проводили в режимах напряжения электрического поля: 50–185–240 В, при постоянной частоте следования электрических импульсов 5 Гц и длительности импульса 0.25 мс. Тестирование электрического воздействия на экспериментальных выборках взрослых рыб выполняли при ступенчатом повышении напряжения в режимах: 10–20–30–40–50–75–130–185–240 В при частоте импульсов 5 Гц и длительности импульса 0.25 мс.

Работа СЭПРО КРУЭВ основана на эффекте создания слабого анодного поля и сильного катодного поля с перемещением максимума катодного потенциала вдоль системы электродов (форма импульсов прямоугольная). Поведение рыб в зоне действия фрагмента шлейфа электродов СЭПРО КРУЭВ анализировали с использованием видеорегирующей камеры (Panasonic Lumix DMC-FZ1000).

Сравнительную эффективность различных режимов отпугивания оценивали визуально – по расстоянию между фронтом стаи рыб и защитным шлейфом, исходя из значений измерительной разметки (с точностью ± 20 см). Кроме того, в лабораторных условиях по видеозаписи определяли точное положение рыб для каждого анализируемого режима. Было выбрано по 6 стоп-кадров приблизительно через каждые 20 сек. С помощью программы ImageJ 1.53e помечали изображения рыб и определяли их координаты в пикселях, а затем в соответствии с масштабным коэффициентом переводили в сантиметры.

Количественными показателями эффективности отхода рыб от работающей системы электродов СЭПРО КРУЭВ при расчетах с позиционированием индивидуальных рыб служило среднее удаление особей от системы электродов СЭПРО КРУЭВ (вдоль линии, перпендикулярной штанге с электродами). Достоверность статистических различий между режимами оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа, а также критерия Краскела–Уоллиса. Корректность

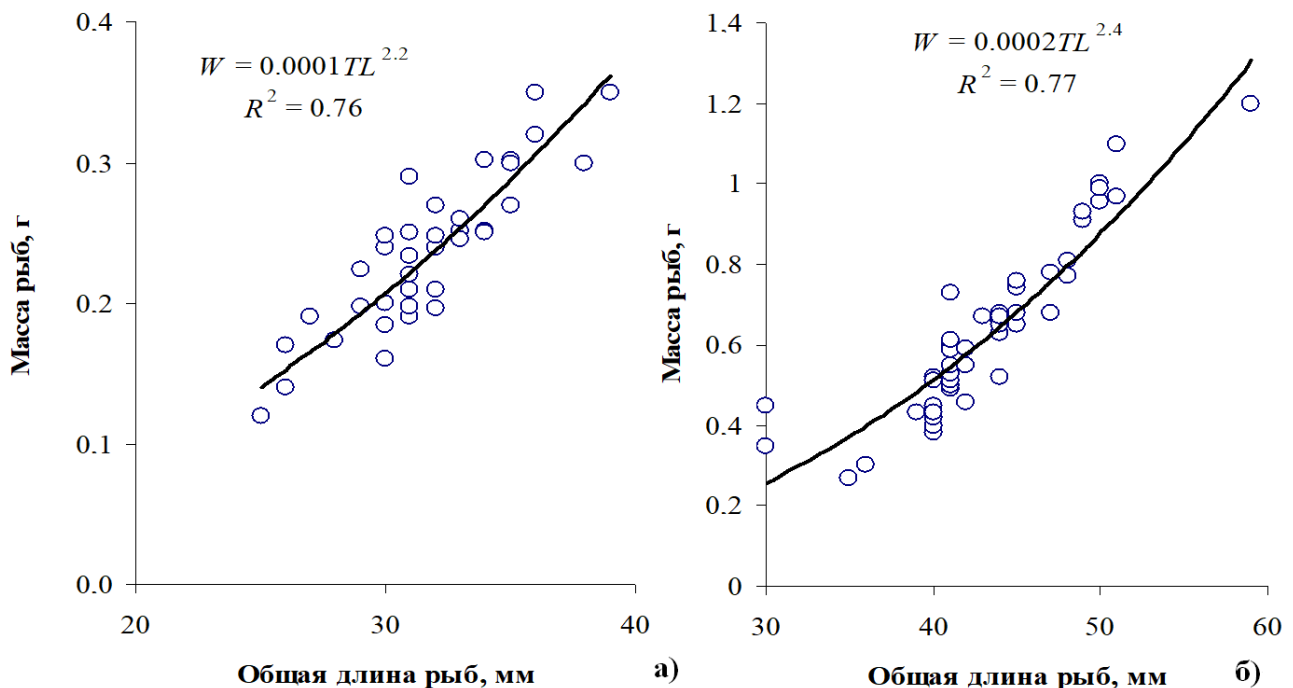
применения используемых статистических методов предварительно проверяли с помощью критериев Шапиро–Вилка (нормальность распределения) и Левена (однородность дисперсии).

*Оценка выживаемости рыб во время и после воздействия СЭПРО КРУЭВ.* Одну группу рыб (экспериментальная) подвергали максимальному воздействию электрического поля: напряжение 240 В, частота импульса 5 Гц, длительность импульса 0.25 мс. Длительность экспозиции экспериментальной группы рыб в электрическом поле СЭПРО КРУЭВ составляла 1 ч. Другая (контрольная) группа рыб размещалась в бассейне с обесточенной системой электродов. По окончании воздействия, а также спустя 24 ч и в конце периода наблюдений (39 сут) подсчитывали количество погибшей рыбы в контрольной и экспериментальной группах.

### Результаты и обсуждение

*Экспериментальные исследования влияния электрического поля СЭПРО КРУЭВ на поведение и распределение молоди и взрослых рыб. Молодь рыб.* Экспериментальные исследования выполняли на молоди воблы и кутума. Размерно-массовые характеристики молоди рыб приведены на рисунке 1. Диапазон размеров молоди рыб в эксперименте: кутум – 30-59 мм (средняя длина – 43 мм), вобла – 25-39 мм (средняя длина – 32 мм).

В ходе серий экспериментального исследования у молоди рыб проявлялось выраженное стайное поведение, что позволило провести первичные визуальные наблюдения за фронтом перемещения стаи, а также, анализируя видеозаписи, рассчитать среднее удаление рыб от линии электродов при разных режимах работы СЭПРО КРУЭВ.



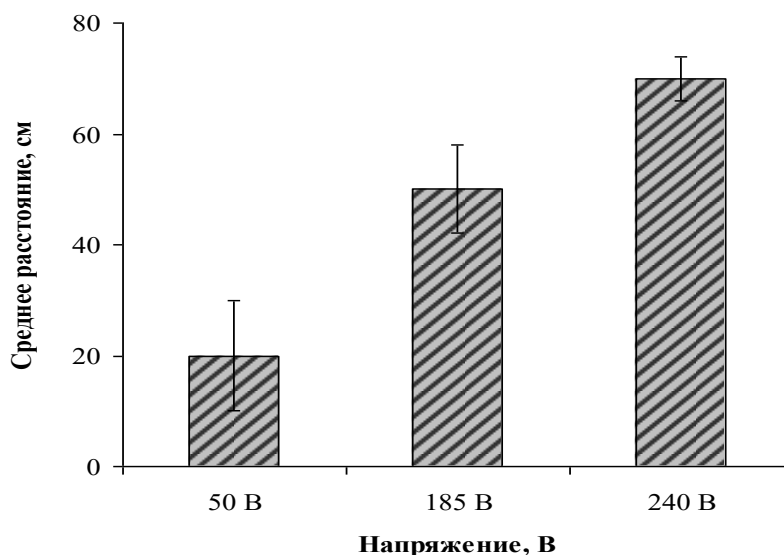
**Рис. 1.** Размерно-массовая характеристика экспериментальной выборки молоди. *Условные обозначения:* а – вобла, б – кутум, TL – общая длина рыб, мм, W – масса рыб, г.

В ходе работ было выяснено, что изменения уровня напряжения приводят к изменению положения фронта экспериментальной выборки молоди относительно створа электродов. Следует отметить, что визуальная оценка расстояния по разметочным линиям вдоль корпуса бассейна (с точностью  $\pm 20$  см) не позволяет провести точный анализ эффекта перераспределения молоди при электрическом воздействии. Поэтому детальное сравнение поведения молоди рыб в разных по интенсивности электрического воздействия режимах работы рыбозаградителя было выполнено по данным видеозаписей (напряжение 50–185–240 В, частота импульсов 5 Гц).

По стоп-кадрам (через каждые 20 секунд видеозаписи) выполнено позиционирование каждой особи в электрическом поле и вычислено среднее удаление рыб от системы электродов

СЭПРО КРУЭВ. Средние дистанции отхода молоди рыб от створа электродов при разных режимах работы электрорыбозаградителя представлены на рисунке 2.

Обнаружено, что уже при минимальном уровне электрического воздействия, при напряжении 50 В, у особей экспериментальной выборки молоди рыб проявлялись безусловно-рефлекторные поведенческие ответы, выраженные в виде «подергивания тела» (сокращения мускульных сегментов) и реакции возбуждения (возрастания уровня двигательной активности). Однако дистанции отхода молоди от створа электродов были не столь значительны, среднее расстояние составляло около 20 см (рис. 2).



**Рис. 2.** Среднее расстояние отхода молоди рыб от шлейфа электродов при разных режимах воздействия рыбозаградителя СЭПРО КРУЭВ.

При относительно высоких уровнях воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ, при напряжении 185 и 240 В, характер распределения молоди рыб изменялся. Фронт экспериментальной выборки молоди рыб смещался от створа электродов на значительно большее расстояние (рис. 2).

В результате однофакторного дисперсионного анализа выявлено, что отмеченный эффект имеет высокую степень достоверности ( $p < 0.001$ ). Перемещения молоди рыб от фрагмента шлейфа электродов СЭПРО КРУЭВ сопровождаются уплотнением скоплений рыб, о чем свидетельствуют показатели разброса данных (рис. 2, величина доверительных интервалов).

Взрослые (половозрелые) рыбы. Исследования проведены на 8 видах рыб, а также гибридной форме осетровых видов рыб (ленский осетр × русский осетр). Размерно-весовые показатели рыб в эксперименте приведены в таблице.

В ходе экспериментальных тестирований при слабом электрическом воздействии рыбозаградителя (напряжение 20 и 30 В), отхода рыб от линии электродов не наблюдалось (рис. 3). По мере увеличения напряжения на электродах у экспериментальных особей рыб четко прослеживалась реакция избегания электрического воздействия, и средняя дистанция удаления рыб от створа рыбозаградителя возрастала (рис. 3). Максимальное удаление рыб от створа электродов составляло от 100 см до 120 см, при напряжении 185 и 240 В соответственно. При этом в отличие от карповых видов рыб, осетровые виды (стерлядь, гибрид ленского и русского осетра) в значительно меньшей мере реагировали на электрические воздействия. Отмечены многократные случаи пересечения линии створа электродов рыбозаградителя особями стерляди и гибридной формы осетровых в режимах ступенчатого повышения напряжения от 10 до 185 В. В режиме работы СЭПРО КРУЭВ с напряжением на электродах 240 В у осетровых рыб зафиксирована реакция избегания при приближении к створу электродов на расстояние 0.3-0.4 м.

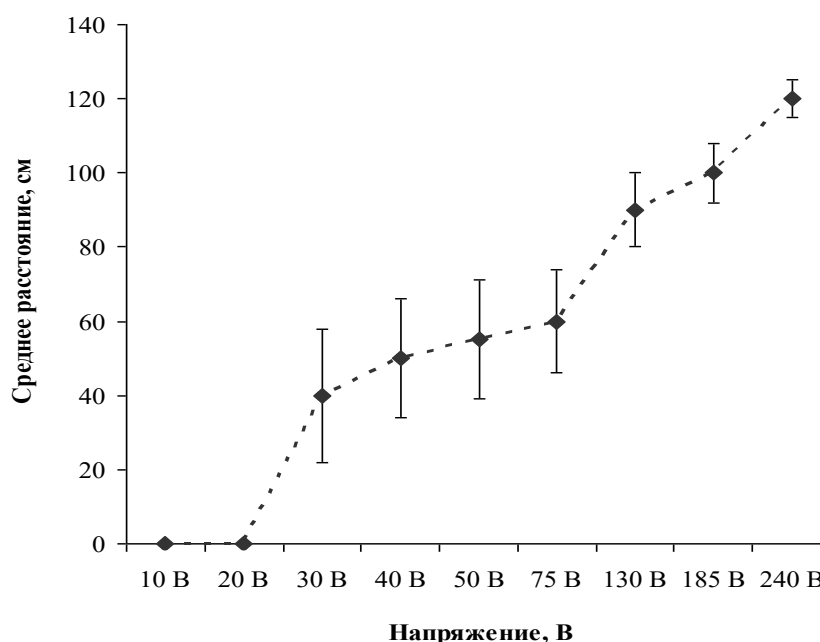
*Экспериментальная оценка выживаемости рыб во время и после воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ.* В ходе экспериментальных исследований случаев гибели рыб при работе электрорыбозаградителя не зафиксировано. Тем не менее, дополнительно была проведена прямая

оценка выживаемости модельных видов рыб после электрического воздействия рыбозаградительного устройства. Следует отметить, что экспериментальная оценка выживаемости рыб, подвергнутых воздействию электрических полей электрорыбозаградителей или орудий электролова, как правило, осуществляется в течение непродолжительного периода действия электрического тока: от 10 до 60 с (Hilgert, 1992). Вместе с тем отмечены случаи, когда рыбы, испытавшие отпугивающее действие электрического барьера, не отходят в безопасную зону и могут на протяжении длительного времени держаться достаточно близко к электрорыбозаградителю (Gosset et al., 1992). Поэтому эксперименты по оценке экологической безопасности электрозаградителя обязательно должны включать в себя проверку «худшего сценария», когда рыбы на протяжении длительного периода экспозиции испытывают максимальные по интенсивности воздействия.

**Таблица.** Размерно-массовая характеристика взрослых (половозрелых) рыб в эксперименте

Вид	Длина, мм ( $M^* \pm SD^{**}$ )	Масса, г ( $M \pm SD$ )
Стерлядь	472.5 ± 41.5	297.5±105.7
Ленский осетр × русский осетр	530	340
Шемая	185.0 ± 31.1	45.0 ± 27.4
Лещ	290.0 ± 14.1	232.0 ± 26.1
Вобла	164.8 ± 16.4	33.5 ± 7.5
Карась	213.6 ± 119.9	78.5 ± 101.4
Рыбец	180	120
Подуст	140	280
Хвальныйский бычок	100	10

**Примечания к таблице 1:**  $M^*$  – среднее значение,  $SD^{**}$  – стандартное отклонение.



**Рис. 3.** Среднее расстояние отхода взрослых (половозрелых) рыб от створа электродов при разных режимах воздействия рыбозаградителя СЭПРО КРУЭВ.

Исходя из этого, при проведении прямой оценки выживаемости рыб после воздействия электрорыбозаградителя (СЭПРО КРУЭВ) был выбран период экспозиции в электрическом поле

равный 1 ч. Данный период экспозиции рыб в электрическом поле рыбозаградителя намного превышает ожидаемые значения (десятки секунд) и позволяет с большим запасом надежности оценить устойчивость рыб к электрическому воздействию. В ходе исследований одну (экспериментальную) группу рыб на протяжении 1 ч подвергали максимальному воздействию электрического поля СЭПРО КРУЭВ (напряжение 240 В, частота импульса 5 Гц, длительность импульса 0.25 мс). Другая (контрольная) группа рыб размещалась в бассейне с обесточенной системой электродов. По окончании электрического воздействия, а также спустя 24 ч после воздействия и в конце периода наблюдений (39 сут) подсчитывали количество погибшей рыбы в контрольной и экспериментальной группах.

Выявлено, что после окончания часового воздействия в контрольной и опытной группах гибели рыб не наблюдается. Выжившие рыбы из обеих групп находились в хорошем состоянии и проявляли высокую двигательную активность. При этом рыбы, подвергшиеся непрерывному часовому воздействию электрического поля СЭПРО КРУЭВ, не отличались в худшую сторону от особей контрольной группы. Большинство особей не имели заметных механических повреждений. Ни у одной из особей экспериментальной (опытной) группы не обнаружено электротравм, покраснения кожных покровов, повреждений позвоночника и внутренних кровоизлияний. При воздействии электрического поля СЭПРО КРУЭВ состояния электрошока у рыб не наблюдалось (потери координации движений не происходило).

Спустя 24 ч после воздействия СЭПРО КРУЭВ отмечены случаи гибели рыб: в контрольной группе – 1 экз. (гибридная форма осетровых видов), в экспериментальной группе – 2 экз. (карась, стерлядь). По завершении всего периода наблюдений (39 сут.) в контрольной группе рыб зафиксирована гибель 4 экз. рыб (гибридная форма осетровых видов – 1 экз., рыбец – 1 экз., шемая – 2 экз.), в экспериментальной группе отмечена гибель 5 экз. рыб (стерлядь – 2 экз., карась – 2 экз., шемая – 1 экз.).

В результате экспериментальной оценки достоверных различий в выживаемости рыб из интактной (контрольной) и подвергнутой электрическому воздействию (экспериментальной) групп рыб не обнаружено. За период наблюдений уровень элиминации особей в контрольной группе рыб составлял 7%, в экспериментальной (опытной) группе рыб – 9%.

### Выводы

Таким образом, экспериментальные исследования поведенческих реакций молоди рыб на электрическое поле СЭПРО КРУЭВ показали, что уже при минимальном уровне электрического воздействия, при напряжении 50 В, у особей экспериментальной выборки молоди рыб проявляются безусловно-рефлекторные поведенческие ответы, выраженные в виде «подергивания тела» (сокращения мускульных сегментов) и реакции возбуждения (возрастания уровня двигательной активности). Однако дистанции отхода молоди рыб от створа электродов были незначительными, среднее расстояние составляло около 0.2 м. При относительно высоких уровнях воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ при напряжении 185 и 240 В характер распределения молоди рыб изменялся. Фронт стай молоди рыб смещался на большие дистанции: 50 и 70 см при напряжении на электродах 185 и 240 В соответственно.

Анализ поведения взрослых рыб при воздействии СЭПРО КРУЭВ показал, что при слабом электрическом воздействии рыбозаградителя в режимах с напряжением 20 и 30 В у исследованных видов рыб реакция избегания фактически отсутствует. Перемещений рыб от створа электродов и достоверных изменений характера распределения экспериментальной выборки рыб не отмечено. Однако по мере увеличения напряжения на электродах у экспериментальных особей рыб уже четко прослеживалась реакция избегания электрического поля и возрастала дистанция их удаления от шлейфа рыбозаградителя. Максимальное удаление рыб от створа электродов (100 и 120 см) зафиксировано при режимах напряжения на электродах 185 и 240 В соответственно. В эксперименте представители осетровых (стерлядь, гибрид ленского и русского осетра) в меньшей мере реагировали на электрическое воздействие, чем карповые.

В ходе исследований случаи гибели рыб при работе электрорыбозаградителя не отмечены. Ни у одной из особей экспериментальной (опытной) группы не обнаружено электротравм, покраснения кожных покровов, повреждений позвоночника и внутренних кровоизлияний.

При воздействии электрического поля СЭПРО КРУЭВ состояния электрошока и потери координации движений у рыб не наблюдалось.

Установлено, что достоверные различия в выживаемости у интактной (контрольной) и подвергнутой электрическому воздействию (экспериментальной) групп рыб отсутствуют. За весь период наблюдений на протяжении 39 суток уровень элиминации особей в контрольной группе рыб составил 7%, а в экспериментальной (опытной) группе рыб – 9%.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках государственных заданий № 124032100075-5, 124032500015-7, 082-00055-24-00 и 122032200284-2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бархалов Р.М.* 2014. Методические указания по сбору и обработке ихтиологического материала. Махачкала: Редакционно-издательский центр ДГПУ. 108 с.
- Бархалов Р.М., Абдусаматов А.С., Столяров И.А., Таибов П.С.* 2016. Рыбохозяйственное значение дагестанского побережья Каспия и рекомендации по сохранению рыбных запасов. Махачкала: АЛЕФ. С. 134 с.
- Бархалов Р.М., Мирзоев М.З., Куниев К.М.* 2012. Рыбы заповедника «Дагестанский». Махачкала: АЛЕФ. 232 с.
- Богуцкая Н.Г., Кияшко П.В., Насека А.М., Орлова М.И.* 2013. Определитель рыб и беспозвоночных Каспийского моря. С.-Пб., М.: Товарищество научных изданий КМК. 543 с.
- Инструкции по сбору и первичной обработке материалов водных биоресурсов Каспийского бассейна и среды их обитания. 2011 / Ред. С.Г. Судакова. Астрахань: КаспНИРХ. С. 5-104.
- Казанчев Е.Н.* 1981. Рыбы Каспийского моря. М.: Легкая и пищевая промышленность. 167 с.
- Правдин И.Ф.* 1966. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность. 376 с.
- Столбунов И.А., Заботкина Е.А., Извеков Е.И., Смирнов А.К., Карабанов Д.П., Салиенко С.Н., Фролов А.В., Мишелович Г.М., Эрслер А.Л.* 2020. Гистологические исследования воздействия системы электронной программируемой комплексного рыбозащитного устройства электрического воздействия (СЭПРО КРУЭВ) на гонады рыб // Рыбное хозяйство. № 1. С. 71-77.
- Столбунов И.А., Извеков Е.И., Смирнов А.К., Карабанов Д.П., Салиенко С.Н., Фролов А.В., Мишелович Г.М., Эрслер А.Л.* 2019а. Экспериментальная оценка выживаемости и травматизма молоди рыб во время и после воздействия электрического поля системы электронной программируемой комплексного рыбозащитного устройства электрического воздействия (СЭПРО КРУЭВ) // Рыбное хозяйство. № 6. 2019. С. 90-94.
- Столбунов И.А., Извеков Е.И., Смирнов А.К., Карабанов Д.П., Салиенко С.Н., Фролов А.В., Мишелович Г.М., Эрслер А.Л.* 2019б. Экспериментальное исследование распределения и поведения молоди и взрослых рыб в зоне воздействия системы электронной программируемой комплексного рыбозащитного устройства электрического воздействия (СЭПРО КРУЭВ) // Рыбное хозяйство. № 6. С. 79-88.
- Столбунов И.А., Салиенко С.Н., Заботкина Е.А., Извеков Е.И., Скуратовская Е.Н., Сигачева Т.Б., Кирич М.П., Подрезова П.С.* 2022. Оценка воздействия электрических полей рыбозащитного устройства на морских рыб // Юг России: экология, развитие. Т.17. № 4. С. 218-232.
- Ainslie B.J., Post J.R., Paul A.J.* 1998. Effects of Pulsed and Continuous DC Electrofishing on Juvenile Rainbow Trout // North American Journal of Fisheries Management. Vol. 18. No. 4. P. 905-918.
- Carline R.F.* 2001. Effects of High-Frequency Pulsed-DC Electrofishing on a Wild Brown Trout Population // North American Journal of Fisheries Management. Vol. 21. No. 3. P. 571-579.
- Gosset C., Travade F., Garaicoechea C.* 1992. Influence d'un écran électrique en aval d'une usine hydroélectrique sur le comportement de remontée du saumon atlantique (*Salmo salar*) // Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture. Vol. 324. P. 2-25.
- Hilgert P.J.* 1992. Evaluation of a Graduated Electric Field as a Fish Exclusion Device // Final Report to Puget Sound Power and Light Co. Environmental Sciences. Bellevue, USA. 29 p.
- Kocovsky P.M., Gowan C., Fausch K.D., Riley S.C.* 1997. Spinal Injury Rates in Three Wild Trout Populations in Colorado after Eight Years of Backpack Electrofishing // North American Journal of Fisheries Management. Vol. 17. No. 2. P. 308-313.
- Nordwall F.* 1999. Movements of Brown Trout in a Small Stream: Effects of Electrofishing and Consequences for Population Estimates // North American Journal of Fisheries Management. Vol. 19. No. 2. P. 462-469.
- Schill D.J., Beland K.F.* 1995. Electrofishing Injury Studies: a Call for Population Perspective // Fisheries. Vol. 20. No. 6. P. 28-29.

ISSN 1993-3916

**ЖУРНАЛ АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ 2024. Т. 30. № 4 (101)**

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 30 ноября 2024 г.



ТОВАРИЩЕСТВО НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ ЖМК

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

Объем 23 п.л.

Тираж 200 экз.

Заказ №

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

**Распространяется только по подписке**

**Подписка осуществляется только по электронному интернет каталогу  
«Урал-Пресс» <https://www.ural-press.ru/catalog>**