ISSN 1993-3916

Том 27 Номер 2 (87) Июнь 2021

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

2021

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

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) ELIBRARY.ru, в базу научной электронной библиотеки “КИБЕРЛЕНИНКА” CYBERLENINCA.ru, в базу Российской государственной библиотеки (РГБ) rsl.ru, в базу данных Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук (БЕН РАН), в базу данных Russian Science Citation Index, размещенную на платформе Web of Science, входит в число реферируемых журналов и Базы данных Scopus, ВИНИТИ, Google Scholar, AGRICOLA, EBSCO Discovery Service, OCLC, Summon by ProQues, 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, https://cyberleninka.ru/journal/n/aridnye-ekosistemy#/1009295

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

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

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Том 27, № 2 (87), 2021, июнь
Журнал основан в январе 1995 г.
Выходит 4 раза в год

Главный редактор
доктор биологических наук, профессор
З.Г. Залибеков**

Заместитель главного редактора
доктор географических наук
Ж.В. Кузьмина*

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

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

Ответственные за выпуск:
Ж.В. Кузьмина*, О.С. Гринченко*(*Ответственный секретарь*)

Адреса редакции:
*Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, ИВП РАН
Телефон: (499) 135-70-41. Fax: (499) 135-54-15
E-mail: arid.journal@yandex.ru

**Россия, 367025, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 45, ПИБР ДНЦ РАН
Телефон: (872-2) 67-09-83
E-mail: arid_journal@mail.ru

Москва: Товарищество научных изданий КМК
2021

СОДЕРЖАНИЕ

Том 27, номер 2 (87), 2021 июнь

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Гидроклиматические характеристики экстремальных засух, наблюдавшихся на русской равнине с 1970-х годов
А.Г. Георгиади, Е.А. Кашутина 3-11

Причинно-следственный анализ деградации экосистем бассейна Байкала на основе долговременного мониторинга сети модельных полигонов
С.Н. Бажа, А.В. Андреев, Е.А. Богданов, Е.В. Данжалова, Ю.И. Дробышев, И.А. Петухов, Ю.А. Рупышев, В.И Убугунова, Л.А. Иванов, С. Хадбаатар, Э.Г. Цыремпилов 12-25

Эколого-биологические аспекты формирования защитных лесных насаждений в аридных регионах
Р.М. Адамова, М-Р.А. Казиев 26-32

Социально-экологические и этико-экономические требования к городским паркам в Гурджате (Пакистан)
М.М. Анвар, Ф. Файяз, А. Азиз, М.Р. Махмуд 33-40

ГИС-моделирование для оценки зеленой инфраструктуры города Малага
Е.Е. Миронова 41-48

Природно-ресурсный потенциал флоры официнальных растений Предкавказья
Н.Б. Леонова, И.М. Микляева 49-56

Современное состояние и ретроспективный анализ популяций сайгака России и Казахстана
Т.Ю. Каримова, А.А. Лущекина, В.М. Неронов 57-67

Цифровая фитоиндикация засоления почв в сухой степи (Республика Калмыкия)
К.О. Прокопьева, М.В. Конюшкова, Н.М. Новикова, И.В. Соболев 68-81

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ

Оценка пригодности агрочерноземов к использованию в оросительной мелиорации в условиях южной лесостепной зоны Республики Башкортостан
Р.Р. Сулейманов, Г.М. Гизатшина, И.М. Габбасова 82-89

Карбонаты в орошаемых почвах Прикаспийской низменности
И.Н. Горохова, И.Н. Чурсин 90-97

Влияние температуры на функциональные характеристики ключевого фермента энергетического обмена скелетных мышц малых сусликов (*Spermophilu spygmaeus* Pall.) степных экосистем
Р.А. Халилов, А.М. Джафарова, В.Р. Абдуллаев, Ш.А. Абакарова 98-105

ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Гидробиологические исследования Терско-каспийского прибрежного района
М.М. Османов, Ф.Ш. Амаева, А.А. Абдурахманова 106-111

Современное состояние и многолетняя динамика зоопланктона Цимлянского водохранилища (р. Дон)
В.И. Лазарева 112-119

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 3-11

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 632.112; 551.579.5

ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАСУХ, НАБЛЮДАВШИХСЯ НА РУССКОЙ РАВНИНЕ С 1970-Х ГОДОВ[1]

© 2021 г. А.Г. Георгиади*, Е.А. Кашутина**

Институт географии РАН
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4
E-mail: galex50@gmail.com, kashutina@igras.ru

Поступила в редакцию 23.10.2020. После доработки 01.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020

На основе многолетних данных о среднемесячной температуре воздуха, сумме атмосферных осадков, гидротермическом коэффициенте увлажнения Г.Т. Селянинова, статистических кривых их пространственного распределения выявлены особенности динамики характеристик экстремальных засух, наблюдавшихся на Русской равнине начиная с 1970-х годов.
Ключевые слова: современное глобальное потепление, экстремальные засухи, границы ареалов экстремальных засух, статистические кривые пространственного распределения, динамика гидроклиматических характеристик в период экстремальных засух.
DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10145

Современное глобальное потепление, начавшееся в 1970-1980-х годах, сопровождалось повышением температуры воздуха и, в меньшей степени, увеличением атмосферных осадков, что вызвало долговременные изменения различных составляющих водного цикла, включая запасы влаги в почве. Так, в период 1958-2007 гг. на значительной части территории Русской равнины, в субширотной полосе, протянувшейся с севера на юг на 9-10° по широте и с запада на восток на более чем 20° по долготе, многолетние изменения осредненных по территории областей и республик продуктивных почвенных влагозапасов под яровыми зерновыми культурами (пшеница и ячмень) характеризуются двумя основными долговременными периодами/фазами (Пространственно-временная корреляция …, 2014-2016). Сначала наблюдалась фаза пониженных значений влагозапасов (рис. 1), а преимущественно с 1980-х гг. ее сменила фаза повышенных влагозапасов. Эти фазы пониженных/повышенных почвенных влагозапасов сопряжены с соответствующими фазами изменений температуры воздуха, ослабления и усиления интенсивности зонального переноса в атмосфере (Георгиади и др., 2013, 2014; Георгиади, Кашутина, 2016).

На фоне долговременных изменений гидрометеорологических характеристик, формировались экстремальные засухи (Раунер, 1981; Золотокрылин и др., 2007, 2014; Страшная и др., 2011; Засухи ..., 2017; Черенкова, 2012; Dobrovolski, 2015). Экстремальные засухи – повторяющееся явление в зоне степей, лесостепей и южной части лесной зоны. Они характеризуются критически неблагоприятными метеорологическими условиями для растительного покрова, в особенности сельскохозяйственных культур. Поэтому анализ засух проводится, как с учетом их гидрометеорологических условий, так и реакции растительного покрова и, прежде всего, агрокультур, проявляющейся в снижении их урожая (Страшная и др., 2011; Фролов, Страшная, 2011). Обычно в качестве критически важных характеристик исследуются экстремально низкое атмосферное увлажнение и высокая температура воздуха на протяжении длительного периода, охватывающего не менее 20-30 дней (проявления атмосферной засухи), а также экстремально низкие влагозапасы почвы (проявления почвенной

[1] Работа выполнена в рамках Госзадания ИГ РАН, при поддержке гранта РНФ. Методические основы были разработаны в рамках государственного задания № 0148-2019-007/АААА-А19-119021990093-08 "Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования". Исследование динамики гидроклиматических характеристик экстремальных засух, наблюдавшихся на Русской равнине было выполнено в рамках гранта РНФ № 20-17-00209 «Гидроэкологическое состояние центральной части Русской равнины в условиях изменений климата и хозяйственных преобразований».

засухи), которые приводят к значительному снижению продуктивности сельскохозяйственных культур. Экстремальные засухи (когда атмосферная и почвенная засухи наблюдаются одновременно) приводят к наиболее значительному снижению урожайности. В условиях экстремальной засухи крайне неблагоприятные для растений условия формируются на обширных территориях (ареалах засух), границы которых меняются в период их развития.

На основе многолетних исследований были выработаны градации изменений гидроклиматических показателей, характеризующих засухи разной интенсивности (Мещерская, 1988; Уланова, Страшная, 2000; Страшная и др., 2011), которые использовались в наших оценках. Наряду с этими показателями у нас в стране и за рубежом были разработаны различные индексы засух, основанные на данных наземных наблюдений, а также на спутниковой информации. Часть из этих индексов довольно широко используется для характеристики географического распространения и интенсивности засух. Среди них гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) Г.Т. Селянинова (1958), индекс засушливости (S_i) Д.И. Педя (1975), а также существенно реже применяемые в нашей стране индекс сухости (ИС) М.И. Будыко, индекс суровости засухи У. Палмера (Palmer Drought Severity Index-PDSI; Palmer, 1965), стандартизованный индекс осадков и испаряемости (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010) и другие. Опыт использования этих индексов, в том числе и наш, показал, что достаточно надежные результаты были получены на основе гидротермического коэффициента Селянинова (Страшная и др., 2011; Черенкова, Золотокрылин, 2016).

Основная задача наших исследований состояла в выявлении особенностей динамики комплекса характеристик засух, включающего в себя показатели изменения метеорологических условий, почвенных влагозапасов и характеристик урожайности агрокультур в период развития экстремальных засух, наблюдавшихся с 1970-х годов.

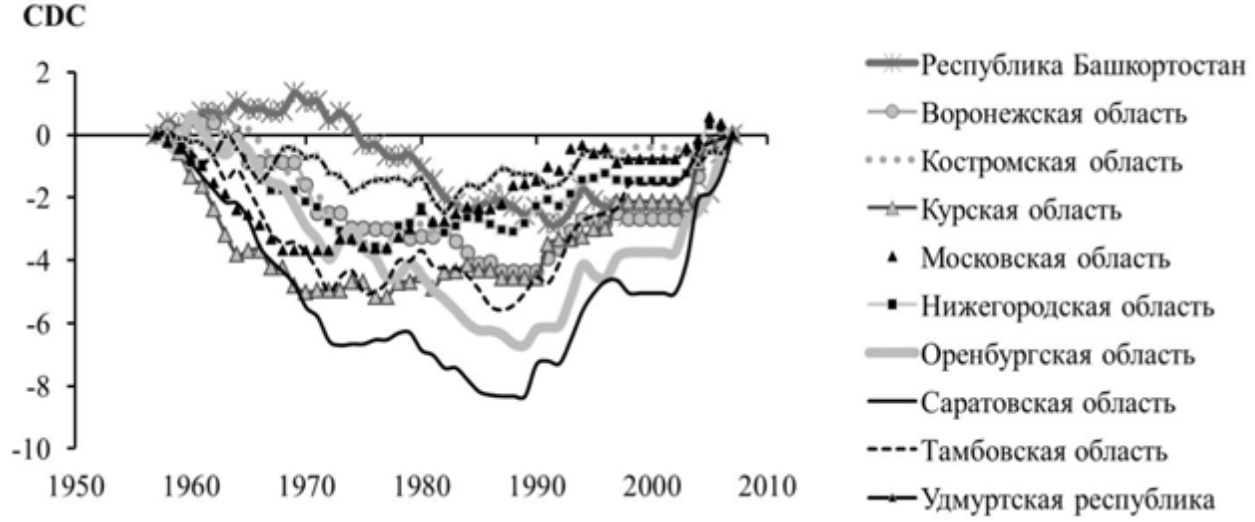

Рис. 1. Долговременные фазы пониженных/повышенных средних областных продуктивных влагозапасов почв, представленные в виде разностно-интегральных кривых.

Материалы и методы

Основу подхода к исследованию динамики гидроклиматических характеристик в период развития засух составляют эмпирические статистические кривые пространственного (территориального) распределения продуктивных влагозапасов почвы, температуры воздуха и атмосферных осадков и гидротермического коэффициента-ГТК, которые позволяют оценить долю территории в пределах ареалов экстремальных засух, где значения гидроклиматических характеристик выходят за пределы их критических значений. Такой подход к описанию пространственной структуры гидрологических характеристик используется в расчетах и прогнозах речного стока (Методические рекомендации …, 1986). Кривые распределения были построены по данным многолетних наблюдений, проводимых на станциях государственной сети наблюдений (ГСН) за почвенными влагозапасами и среднемесячным значениям ГТК (рассчитанным по

среднемесячным температурам воздуха и суммам атмосферных осадков из архива ВНИИГМИ-МЦД (Булыгина и др., 2020а, 2020б) и сеточным многолетним данным среднесуточных данных о температуре воздуха и атмосферным осадкам с шагом 0.25° на 0.25° по широте и долготе из Европейского архива (European Climate ..., 2020).

В качестве границ ареалов, в пределах которых исследовалась статистистическая структура временных изменений полей гидроклиматических характеристик экстремальных засух, использовались данные о годовых аномалиях средней областной (средней по территории субъекта РФ) урожайности яровой пшеницы. Выбор этой культуры для оценки засухи определялся двумя факторами: 1) зерновые культуры чувствительны к засухам и отражают интегральный эффект сложившихся в период засухи гидроклиматических условий; 2) посевы яровой пшеницы охватывают значительную территорию зернового пояса Русской равнины. Использовались многолетние ряды урожайности этой культуры за период 1972-2010 гг. В связи с тем, что 1) для периода 1972-1989 гг. урожайность рассчитывалась с площади, которая засеивалась, а в период 1990-2010 гг. – с площади, с которой был собран урожай и 2) в период 1972-1989 гг. многолетний тренд в изменении урожайности практически отсутствовал, тогда как в период 1990-2010 гг. наблюдался ее интенсивный рост, расчет аномалий (модульных коэффициентов) урожайности в годы, в которые наблюдались засухи, проводился по-разному. В первом случае модульные коэффициенты рассчитывались от среднего многолетнего значения, определенного для периода 1972-1989 гг. Во втором – для каждого года определялось отклонение от линии тренда (Страшная и др., 2011). И в том, и в другом случае в качестве «критической» величины относительного снижения урожайности, показывающего засуху, использовались ее значения, меньшие ее «нормальных» значений. Этот критерий и был использован для отнесения субъекта РФ к ареалу засухи. Именно данные о снижении урожайности служили для выделения границ ареалов экстремальных засух. В пределах таких ареалов и анализировались особенности территориальной динамики гидроклиматических характеристик в период развития рассматриваемых засух.

Заметим, что использование для этих целей данных об урожайности, осредненной для меньших по площади территорий (например, административных районов в пределах субъектов РФ), видимо, позволило бы уточнить границы ареалов экстремальных засух, исключив административные районы, в которых та или иная культура не возделывается. С другой стороны в результате такого «уточнения» могут быть исключены территории, где условия для формирования экстремальной засухи сформированы (атмосферная засуха и критически низкие влагозапасы), а те или иные агрокультуры не возделываются. Таким образов, для определения границ экстремальных засух необходимо использовать как информацию о гидроклиматических условиях, так и данные о снижении урожайности сельскохозяйственных культур и данные о состояние растительного покрова.

Были рассмотрены экстремальные засухи, наблюдавшиеся в эпоху современного глобального потепления на территории Русской равнины в 1972, 1975, 1981, 1995, 1998, 1999 и 2010 гг.

В целом географическое положение ареалов распространения экстремальных засух достаточно устойчиво, но география аномалий снижения урожайности зерновых культур и гидроклиматических характеристик в период наиболее интенсивных засух, а также характер их сезонной динамики заметно отличаются.

В качестве критических значений интенсивности экстремальных засух применительно к продуктивным влагозапасам почв согласно работам (Уланова, Страшная, 2000; Страшная и др., 2011; Фролов, Страшная, 2011) были использованы их следующие значения: для слоя 0-20 см менее 10 мм – сильная по интенсивности почвенная засуха, 10-19 мм – средняя или слабая засуха; для слоя 0-100 см ниже 50 мм – сильная, 50-80 мм – средняя и слабая засуха. Для температуры воздуха в качестве критических были определены температуры выше 25, 22.5 и 20°С, а для атмосферных осадков – ниже 5, 10 и 15 мм, наблюдавшиеся в течение 30 суток.

В качестве интегрального показателя гидроклиматических условий экстремальных атмосферных засух использовался гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (1958). Согласно работе А.И. Страшной с соавторами (2011), при ГТК≤0.3 наблюдается очень сильная засуха, при 0.3<ГТК≤0.60 – сильная засуха, а при 0.6<ГТК≤0.8 – средняя.

Границы ареалов экстремальных засух, определенных по снижению урожайности, влагозапасов почв и ГТК, достаточно хорошо коррелируют между собой (рис. 2).

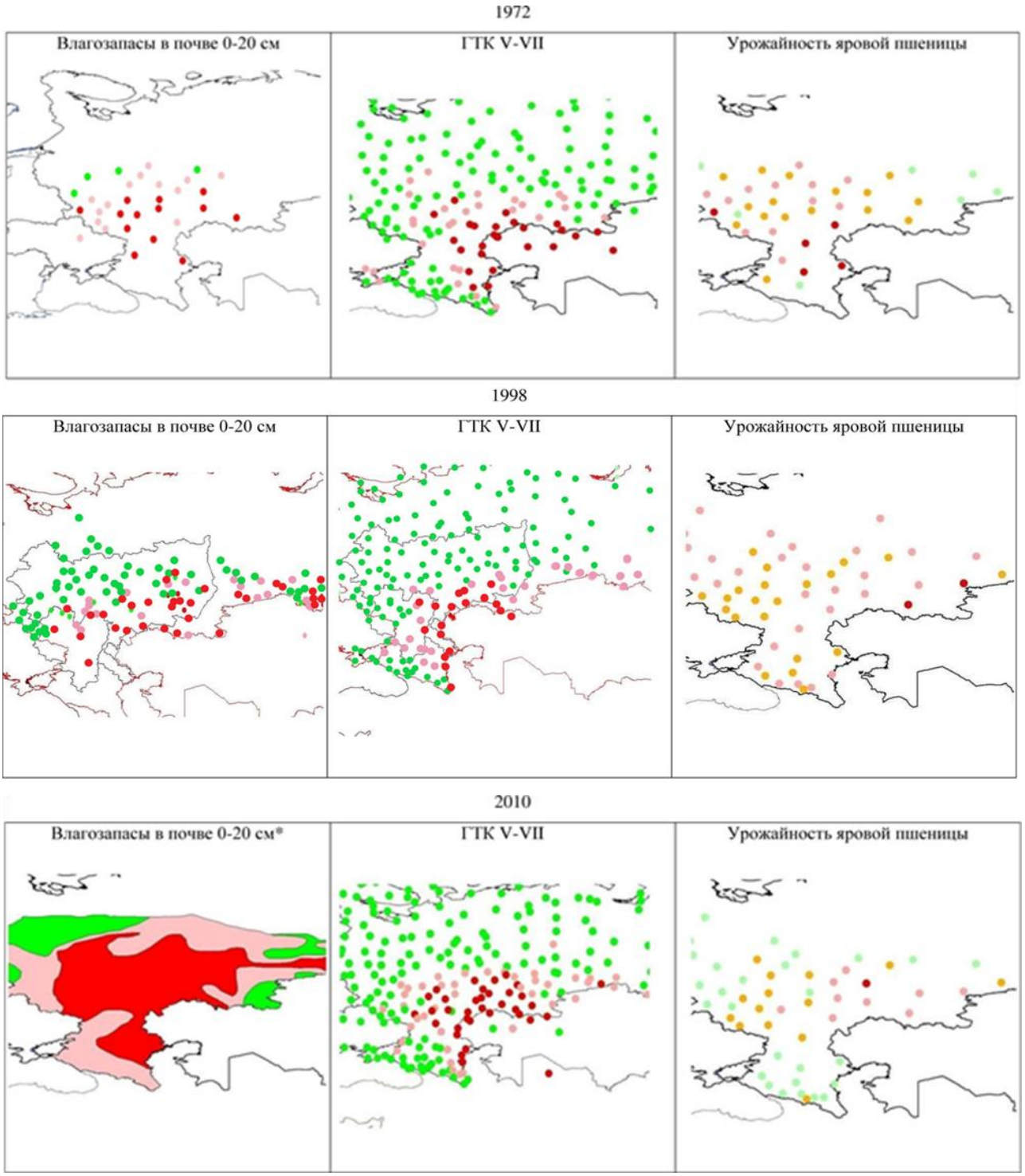

Рис. 2. Ареалы снижения урожайности яровой пшеницы, влагозапасов в слое почвы 20 см и ГТК для экстремальных засух, наблюдавшихся в 1972, 1998 и 2010 гг. *Условные обозначения.* Влагозапасы в июле (в 1972 г. – в июне), мм: ● – ≤10, ● – 10-19, ● – ≥19. ГТК V-VII: ● – ≤0.3. ● – 0.3-0.6, ● – ≥0.6. Урожайность[2] яровой пшеницы: ● – ≤0.5, ● – 0.5-0.75, ● – 0.75-1, ● – ≥1. * – картосхема влагозапасов подготовлена по данным из статьи А.В. Фролова и А.И. Страшной (2011).

[2] Урожайность дана в модульных коэффициентах, которые рассчитывались от среднего многолетнего значения для периода 1972-1989 гг., и для периода 1990-2010 гг. – по отклонениям от линии тренда.

Результаты и обсуждение

Для определенных указанным выше способом границ ареалов экстремальных засух для каждого месяца за период апрель-июль (август) были исследованы особенности сезонных изменений доли их площади, для которых гидроклиматические характеристики были ниже (или выше) их критических значений, рассмотренных в предыдущем разделе.

Сезонная динамика территориального распределения гидроклиматических характеристик в пределах границ экстремальных засух

Атмосферные осадки. Наибольшая доля площади ареалов с экстремальной засухой с количеством осадков меньше 5, 10 и 15 мм в месяц приходилась на апрель 1975, 1995 и 2010 гг., май – 1972, 1975 и 1998 гг., июнь – 1975, 1998 и 2010 гг., июль – 1972 и 2010 гг., август – 1972 г. (рис. 3), в котором наблюдались также наибольшие площади с критически низкими осадками (соответственно, 66%, 72% и 84% территории всего ареала с экстремальной засухой).

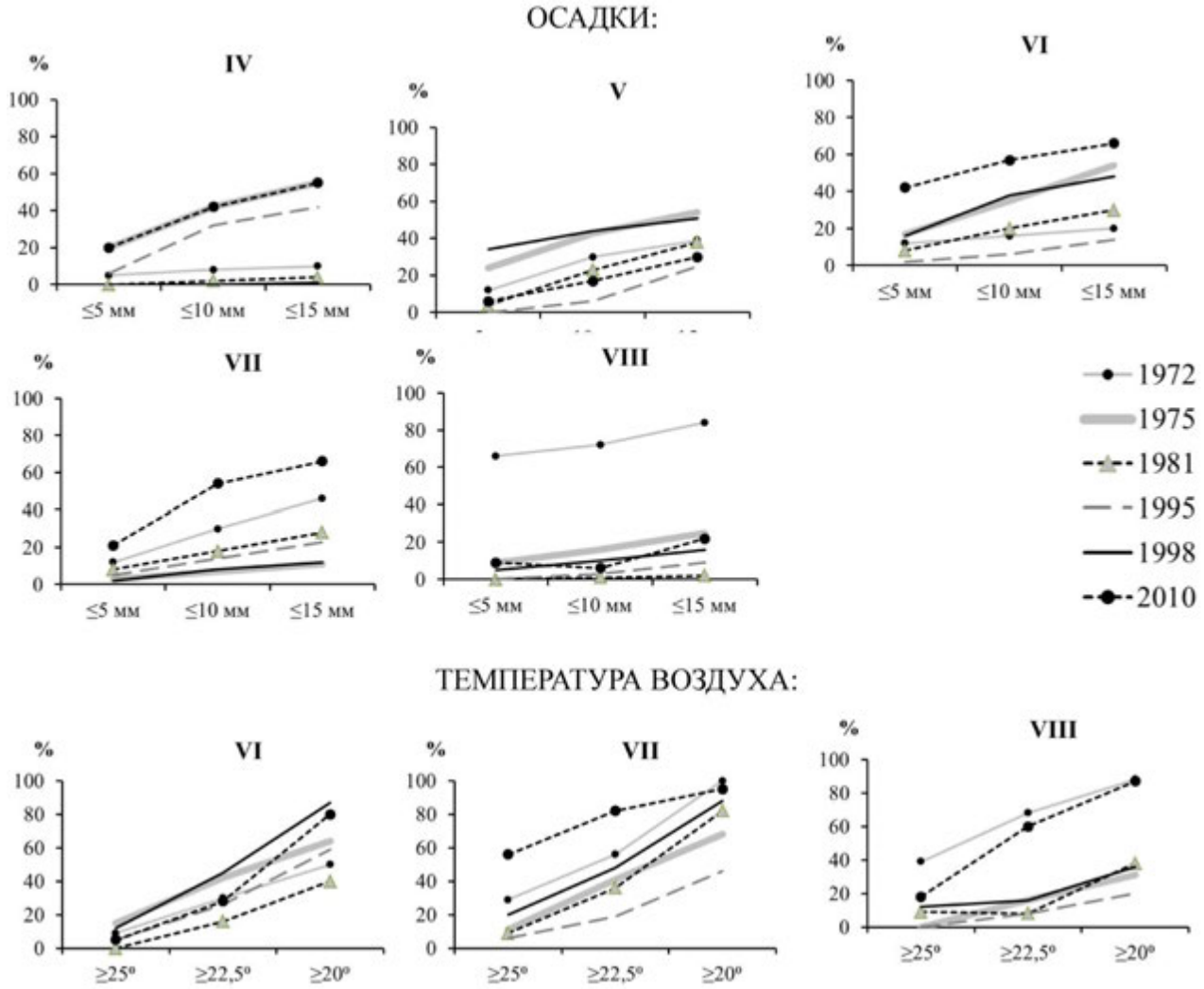

Рис. 3. Сезонная динамика доли площади ареалов экстремальных засух, в которых а) сумма атмосферных осадков была меньше 5, 10 и 15 мм, б) температура превышала 25, 22.5 и 20°С.

Температура воздуха. Наибольшие доли площади с высокой температурой воздуха (соответственно, выше 25, 22.5 и 20°С) в июле и августе наблюдались в 2010 и 1972 гг., в июне – в 1998 и 1975 гг. (за исключением территории с температурой выше 20°С; рис. 3). Одна из двух самых больших относительных долей площади ареала экстремальной засухи с температурой воздуха выше 20°С

наблюдалась в июне 2010 г. При этом наименьший общий разброс долей в годы с экстремальными засухами наблюдался в июне. В июле и августе он был примерно одинаков с одной важной особенностью. В июле из общего ряда выделялся один год (2010 г.), в августе – два (1972 и 2010 гг.).

Гидротермический коэффициент увлажнения. Наибольшей доли площади ареалов с засухами, выделенными по снижению урожайности яровой пшеницы, с атмосферной засухой разной степени интенсивности достигают в июне (1975, 1981, 1998 гг.) и в июле (1972, 1995, 2010 гг.; рис. 4).

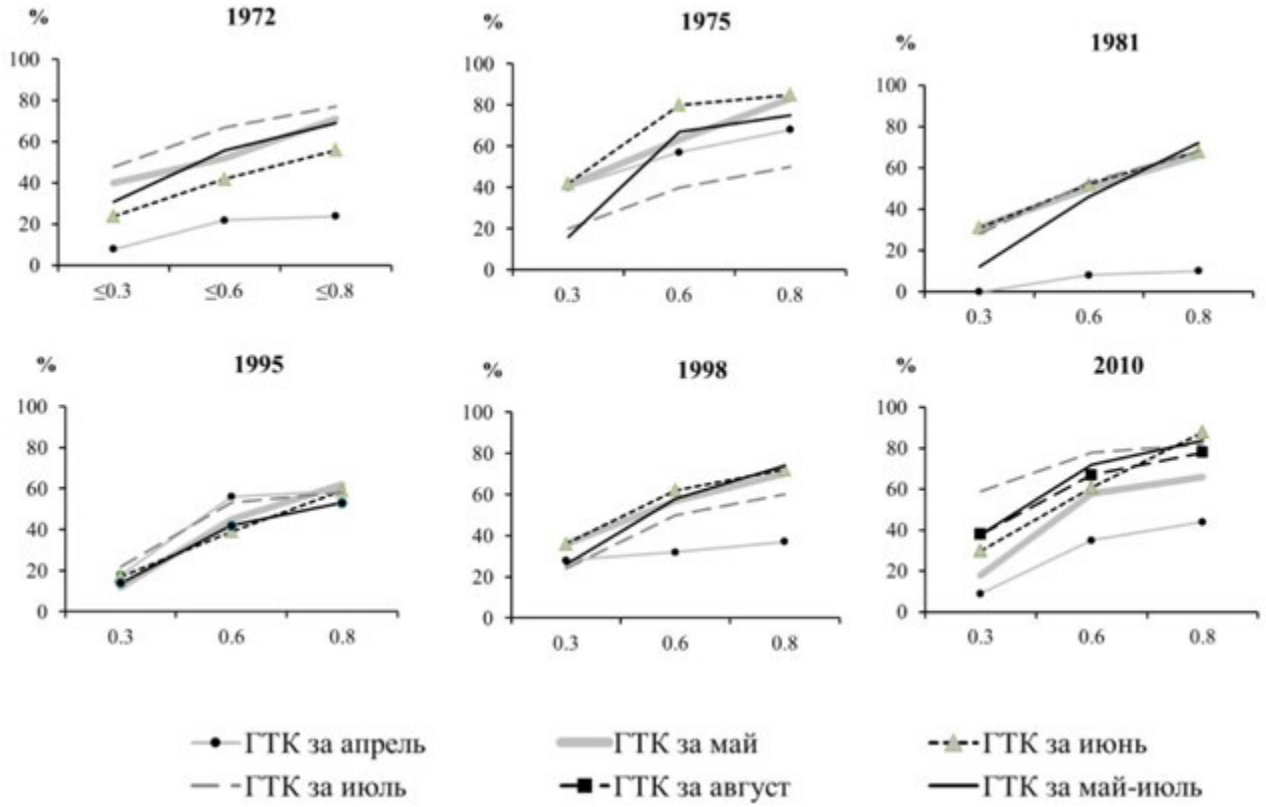

Рис. 4. Сезонная динамика доли площади ареалов экстремальных засух, в которых наблюдалась атмосферная засуха разной интенсивности.

Самую большую относительную долю ареала экстремальная атмосферная засуха охватывала в июне 1975 г.: 42% (при ГТК<0.3) и 85% (ГТК<0.8). В июле 2010 г. эти доли составляли, соответственно, 59% и 82%, а в июле 1972 г. – 48% и 77%. При этом в 1981, 1995, 1998 гг. доли площади ареалов с атмосферной засухой разной интенсивности в мае, июне, июле и в среднем за май-июль (а в 1995 г. также и в апреле) отличались между собой незначительно. Напротив, в 1972, 1975, 2010 гг. эти различия были существенно заметнее.

Как правило, наиболее низкие доли площади с атмосферной засухой разной степени интенсивности наблюдаются в апреле (1972, 1981, 1998 и 2010 гг.), исключая 1995 и 1975 гг.

Продуктивные влагозапасы почвы. В 1972 и 1975 гг. ко второй декаде июля практически на всей территория ареала с засухой влагозапасы достигали критически низких значений, соответствующих как сильной, так и средней или слабой интенсивности почвенной засухи в слоях глубиной 20 см и 1 м (рис. 5).

В 1981 г. почти на всей территории влагозапасы были равны или меньше уровня, соответствующего средней или слабой интенсивности почвенной засухи, тогда как влагозапасы ниже уровня сильной засухи занимали более 50% (для слоя 20 см) и около 40% всей территории (для слоя 1 м). В другие годы (1995 и 1998 гг.) почвенная засуха наблюдалась на меньшей территории, особенно в 1995 г. Наиболее быстрый рост площадей с почвенной засухой происходил с апреля по май (особенно в 1972, 1975 и 1995 гг.), а в 1981 г. – с мая по июнь. В апреле в 1981 г. территорий с почвенной засухой практически не наблюдалось, а в апреле 1975 г. они были уже хорошо выражены. Значительная доля территорий с почвенной засухой, продолжавшейся в течение мая-июля,

отмечается в 1972, 1975 и в меньшей степени в 1995 г. В 1981 гг. такая ситуация была характерна для июня-июля.

Заключение

На фоне современного глобального потепления, начало которого относится к 1970-1980-м годам, довольно часто (один раз в несколько лет) на территории Русской равнины формируются экстремальные засухи, охватывающие большие территории, распространяясь на зоны степей и лесостепей и южную часть лесной зоны. При этом они сопровождаются значительными потерями урожая сельскохозяйственных культур, в особенности зерновых.

Основу подхода к исследованию динамики гидроклиматических характеристик в период развития экстремальных засух составляют эмпирические кривые статистической структуры территориального распределения продуктивных влагозапасов почвы, температуры воздуха и атмосферных осадков, а также гидроклиматических индексов засухи, которые позволяют оценить динамические изменения доли территории в пределах ареалов экстремальных засух, где значения гидроклиматических характеристик выходят за пределы их критических значений. В качестве границы ареалов экстремальных засух использовались данные о снижении среднеобластной урожайности зерновых культур.

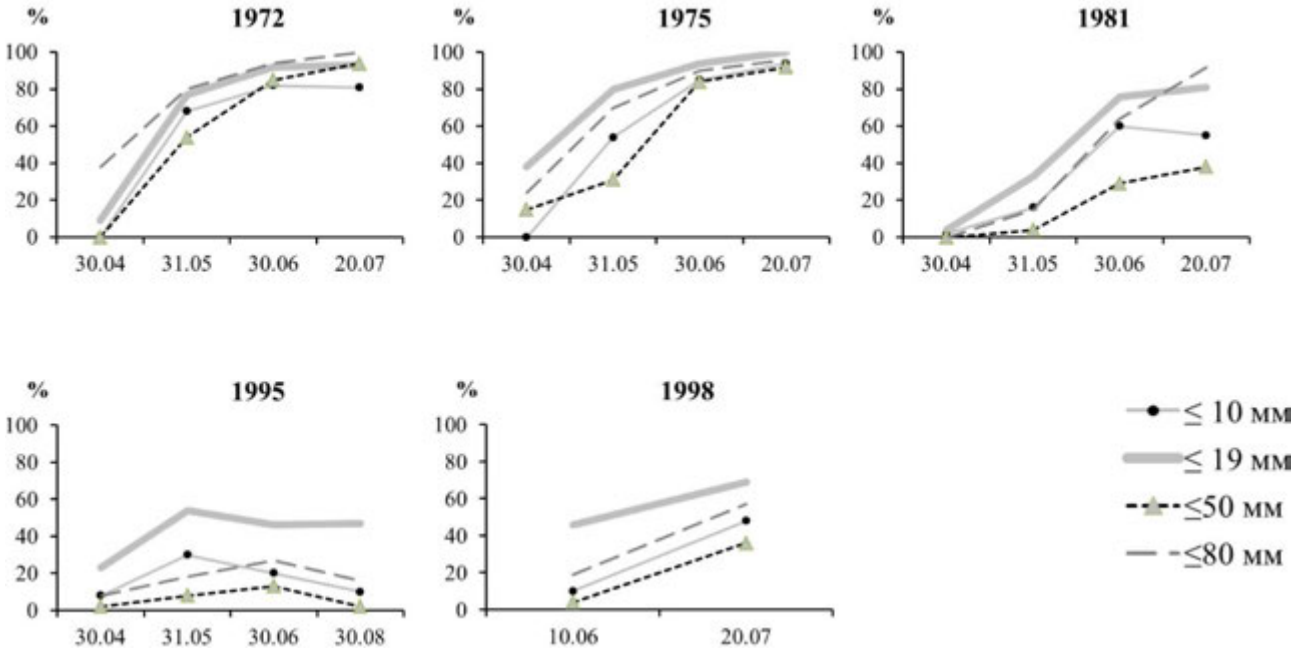

Рис. 5. Сезонная динамика доли площади ареалов экстремальных засух с продуктивными влагозапасами, не превышающими 10 и 19 мм в слое почвы 0-20 см, и не превышающими 50 и 80 мм в слое почвы 0-100 см.

Территориальное распределение гидроклиматических характеристик в пределах границ экстремальных засух, наблюдавшихся в 1972, 1975, 1981, 1995, 1998 и 2010 гг., характеризуется следующими особенностями. Наибольшей доли площади ареалов экстремальных засух, на которых формируется атмосферная засуха разной степени интенсивности, достигали в июне (1975, 1981, 1998 гг.) и в июле (1972, 1995, 2010 гг.). В июне 1975 г., в июле 1972 г. и 2010 г. атмосферная засуха разной степени интенсивности охватывала соответственно 85%, 82% и 77% территории, а сильная атмосферная засуха 42%, 59% и 48%. При этом в 1981, 1995, 1998 гг. доли площади ареалов с атмосферной засухой разной интенсивности в мае, июне, июле и в среднем за май-июль (а в 1995 г. также и в апреле) отличались между собой незначительно. Напротив, в 1972, 1975, 2010 гг. эти различия были очень заметны.

Продуктивные влагозапасы почвы в 1972, 1975 гг. ко второй декаде июля практически на всей территория ареала с засухой достигали критически низких значений, соответствующих как сильной,

так и средней или слабой почвенной засухе для почвенных слоев в 20 см и в 1 м. В 1981 г. почти на всей территории влагозапасы были равны или меньше уровня, соответствующего почвенной засухе средней или слабой интенсивности, тогда как влагозапасы ниже уровня сильной засухи занимали более 50% (для слоя почвы 20 см) и около 40% всей территории (для слоя почвы в 1 метр). В другие годы (1995 и 1998 гг.) почвенная засуха наблюдалась на меньшей территории. Наиболее быстрый рост площадей с почвенной засухой происходил с апреля по май (особенно в 1972, 1975 и 1995 гг.), а в 1981 г. с мая по июнь. В апреле 1981 г. территорий с почвенной засухой практически не наблюдалось, а в апреле 1975 г. они были уже хорошо выражены. Значительная доля территорий с почвенной засухой, продолжавшейся в течение мая-июля, отмечалась в 1972, 1975 гг. и в меньшей степени в 1995 г. В 1981 гг. такая ситуация была характерна для июня-июля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. 2020а. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 [Электронный ресурс http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных (дата обращения 23.10.2020)].

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. 2020б. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 [Электронный ресурс http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных (дата обращения 23.10.2020)].

Георгиади А.Г., Кашутина Е.А., Бородин О.О., Вишневская И.А. 2013. Пространственно-временная корреляция влагозапасов почвы, климатических и спутниковых индексов на Русской равнине // Одиннадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» [Электронный ресурс http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=78&thesis=3938 (дата обращения 23.10.2020)].

Георгиади А.Г., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. 2018. Долговременные фазы многолетних изменений стока воды и тепла крупнейших арктических рек России // Тезисы докладов всероссийской конференции «Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий», 24-29 сентября 2018 года, Сочи. М.: Институт географии Российской академии наук, Гляциологическая ассоциация. С. 53.

Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным. 2017 / Ред. О.Н. Соломина. М.-СПб.: Нестор-История. 358 с.

Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Мещерская А.В., Страшная А.И., Черенкова Е.А. 2014. Засухи и опустынивание // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. С. 551-587.

Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Черенкова Е.А. 2007. Динамика засух в Европейской России в ситуации глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат. Т. 21. С. 160-181.

Методические рекомендации по оценке запасов воды на поверхности водосборов в период весеннего снеготаяния на основе авиационных гамма-съемок. 1986. Ленинград. 38 с.

Мещерская А.В. 1988. О показателе засух и урожайности зерновых культур // Метеорология и гидрология. № 2. С. 91-98.

Педь Д.А. 1975. Климатические особенности атмосферных засух и избыточного увлажнения // Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 156. С. 39-63.

Пространственно-временная корреляция долговременных и экстремальных гидрологических и климатических изменений. 2014-2016. Проект РФФИ № 14-05-00761.

Раунер Ю.Л. 1981. Климат и урожайность зерновых культур. М.: Наука. 163 с.

Селянинов Г.Т. 1958. Происхождение и динамика засух // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Л.: Гидрометеоиздат. С. 5-30.

Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. 2014 / Ред. А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, И.П. Милюкова и др. М.: МАКС Пресс. 214 с.

Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В. 2011. Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Труды Гидрометцентра. Вып. 345. С. 171-188.

Уланова Е.С., Страшная А.И. 2000. Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур // Труды ВНИИСХМ. Вып. 33. С. 64-83.

Фролов А.В., Страшная А.И. 2011. О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // Сборник докладов ГУ «Гидрометцентр России» М.: ТРИАДА ЛТД. 72 с.

Черенкова Е.А. 2012. Анализ особенностей обширных атмосферных засух на юге Европейской равнины //

Аридные экосистемы. Т. 18. № 4 (53). С. 13-21. [*Cherenkova E.A.* 2012. Analysis of extensive atmospheric droughts features in the South of European Russia // Arid Ecosystems. Vol. 2. No. 4. Pp. 209-215.]

Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. 2016. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. № 2. С. 79-94.

Dobrovolski S.G. 2015. World Droughts and Their Time Evolution: Agricultural, Meteorological, and Hydrological Aspects // Water Resources. Vol. 42. No. 2. P. 147-158.

European Climate Assessment & Dataset project. 2020 [Электронный ресурс www.ecad.eu (дата обращения 19.10.2020)].

Palmer W.C. 1965. Meteorological Droughts. US Department of Commerce Weather Bureau Researh Paper. No. 45. 58 p.

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. No. 23 (7). P. 1696-1718.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 12-25

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 581.5; 528.94

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕГРАДАЦИИ ЭКОСИСТЕМ БАССЕЙНА БАЙКАЛА НА ОСНОВЕ ДОЛГОВРЕМЕННОГО МОНИТОРИНГА СЕТИ МОДЕЛЬНЫХ ПОЛИГОНОВ[1]

© 2021 г. С.Н. Бажа*, А.В. Андреев*, Е.А. Богданов*, Е.В. Данжалова*, Ю.И. Дробышев*, И.А. Петухов*, Ю.А. Рупышев, В.И Убугунова**, Л.А. Иванов*** С. Хадбаатар****, Э.Г. Цыремпилов****

**Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН*
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: monexp@mail.ru
***Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения РАН*
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. E-mail: rupyshev@mail.ru
****Ботанический сад Уральского отделения РАН*
Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202а. E-mail: leonid.ivanov@botgard.uran.ru
*****Монгольский государственный университет образования*
Монголия, 2106489, г. Улан-Батор, ул. Бага Тойруу, д. 14. E-mail: hadbaatar@mail.ru

Поступила в редакцию 06.11.2020. После доработки 27.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020.

В статье излагаются главные причины и последствия дестабилизации экосистем в бассейне озера Байкал, выявленных с помощью долгосрочного мониторинга. Основой мониторинга является сеть модельных полигонов и ключевых участков, заложенных авторами в зонах повышенной экологической напряженности, на которых осуществляется крупномасштабное картографирование и проводится комплекс ландшафтоведческих и почвенно-геоботанических исследований. Оценена степень нарушенности природной среды региона, выявлены факторы деградации и установлен характер деградационных процессов в разных типах наземных экосистем бассейна Байкала.

Ключевые слова: мониторинг, экологическое картографирование, деградация экосистем, бассейн Байкала.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10146

Бассейн Байкала, расположенный на территории двух государств – России и Монголии, обладает уникальным для северной Палеарктики богатством флористико-фаунистического состава и разнообразием экосистем и ландшафтов. С экономической точки зрения территория бассейна Байкала является динамично развивающимся регионом Южной Сибири и Северной Монголии. Здесь сосредоточена большая часть населения Республики Бурятия и Монголии, интенсивно развивается горнодобывающая и лесообрабатывающая промышленность. В свою очередь, монгольская часть бассейна характеризуется интенсификацией сельскохозяйственного использования биоресурсов: быстрым приростом поголовья скота и расширением площади земель, задействованных в богарном земледелии. Всё это, несомненно, оказывает как прямое, так и косвенное воздействие на природную среду региона, вызывающая развитие деградационных процессов в экосистемах, что в конечном итоге определяет антропогенную нарушенность ландшафтов (Тулохонов, 1996; Экосистемы …, 2005; Дгебуадзе и др., 2009; Антропогенная …, 2012). Последнее вызвано не только постоянно возрастающей хозяйственной нагрузкой на окружающую среду, но и природными процессами, среди которых, в частности, можно отметить общую аридизацию климата.

Оценка прямых и обратных связей между деятельностью людей и состоянием окружающей среды возможна только при проведении мониторинговых работ на специально выбранных для этих целей территориях: модельных полигонах, стационарах, экспериментальных площадях или ключевых

[1] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-29-05019 офи_м «Опасные деградационные процессы и их роль в формировании антропогенно-трансформированных ландшафтов в бассейне Байкала».

участках. Основанием для этого является соблюдение главных принципов, заложенных в концепции глобального оперативного контроля за состоянием природной среды, разработанных отечественными учеными (Герасимов, 1975; Израэль, 1979; Виноградов, 1984) и дополненные Е.И. Панковой (1993), Е.А. Востоковой с соавторами (2004) и П.Д. Гуниным с соавторами (2015б) при организации регионального экологического мониторинга, который включает:

- комплексность показа основных компонентов экосистем (рельеф, почвенный покров, растительные сообщества в их взаимосвязи при определении классификационного положения экосистем);
- единовременность, которая достигается фиксацией состояния всех экосистем на единый момент времени экологического картографирования;
- системность при разработке базовых карт, включающих пространственное распределение экосистем в их современном состоянии с показом их антропогенной нарушенности.

В связи с этим в российской и монгольской частях бассейна оз. Байкал для проведения мониторинговых работ были выбраны репрезентативные модельные полигоны (МП) и ключевые участки (КУ) в зонах повышенной экологической напряженности, расположенные вдоль Трансбайкальской субмеридиональной трансекты (рис.).

Целью проведенных исследований являлось определение степени развития и особенностей распространения основных типов деградационных процессов в почвенно-растительном покрове экосистем в связи с воздействием главных факторов хозяйственной деятельности.

Объекты и методы исследования

Сеть МП и КУ охватывает пять наиболее крупных физико-географических провинций бассейна оз. Байкал (Экологический …, 2015) и представляет основные типы наземных автоморфных (горнолесных, горно-лесостепных, степных) и гидроморфных (пойменно-долинных, котловинно-приозерных) экосистем. В том числе были выбраны МП на периферии бассейна Байкала для изучения трансграничных взаимодействий, протекающих в растительном покрове, на границе с Центрально-Азиатским бессточным бассейном (МП «Тосонцэнгэл» и «Унджул») и для изучения структуры и состояния экосистем на границе с бассейном р. Амур (МП «Сэргэлэн»; рис., табл.). В качестве основных типов хозяйственного воздействия, определивших главные эколого-географические и социально-экономические проблемы Байкальского региона, исходя из ранее проведенных исследований (Гомбоев, 2006; Бешенцев, 2008; Антропогенная …, 2012; Тулохонов, 2012; Снытко и др., 2013), были выделены лесохозяйственный, сельскохозяйственный (пастбищный, земледельческий), горнопромышленный и рекреационный. Главными объектами изучения и оценки степени развития опасных деградационных процессов служат природно-территориальные комплексы или геосистемы, выделенные нами на основе крупномасштабного геоинформационного ландшафтно-экологического картографирования. С этой целью, для каждой территории подбирались материалы дистанционного зондирования Земли с высоким и очень высоким разрешением (0.5-2.5 м), на основе которых проводились полевые работы для определения структурной организации экосистем, включающие их инвентаризацию, оценку состояния и распространения деградационных процессов.

Достоверными критериями оценки антропогенного воздействия на экосистемы являются специфические различия почв, растительности и их морфологии. Нами использовались следующие параметры: состояние почвенного покрова (мощность гумусового горизонта, содержание гумуса, влажность), его нарушенность (эрозия, опесчаненность, защебненность), фитоценотические показатели растительных сообществ (высота, проективное покрытие, продуктивность), его структура, изменения флористического состава, наличие индикаторных видов, жизненность видов растений, степень уничтожения или повреждения древостоя. Дифференциация по степени антропогенной нарушенности проводилась по 5 основным группам (незначительно нарушенные, слабо нарушенные, средне нарушенные, сильно нарушенные, очень сильно нарушенные; Методология … , 1993; Бажа и др., 2013).

Полевые работы включали в себя весь комплекс геоботанических и почвенных исследований с отбором проб на определение продуктивности растительности, влажности почв, их гранулометрический и химический состав (Бажа и др., 2013).

МП, имеющие типичный для своего природного региона набор экосистем, служили базовыми территориями для проведения их инвентаризации на основе крупномасштабного картографирования

и выяснения характерных для них деградационных процессов. Они имеют значительную площадь, а масштаб их картографирования в основном составлял 1:200000. КУ выбирались чаще всего в пределах полигонов или в непосредственной близости к ним с целью более детального изучения факторов антропогенного воздействия и изучения наиболее опасных процессов деградации экосистем и механизма их проявления. Они имеют меньшую площадь, но более крупный масштаб картографирования (табл.).

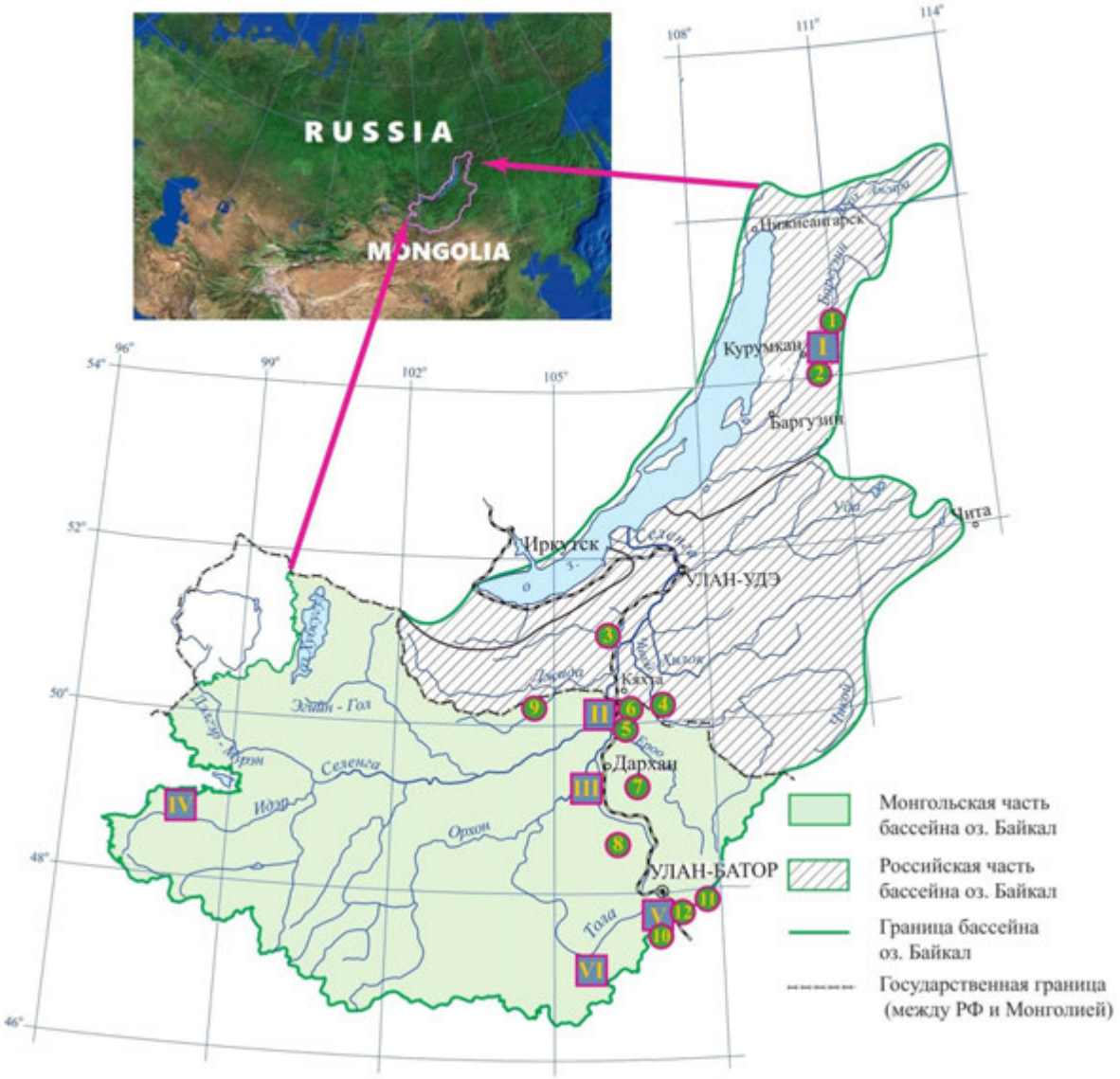

Рис. Расположение модельных полигонов и ключевых участков в бассейне оз. Байкал. *Условные обозначения*: индексы и характеристика МП и КУ даны в таблице.

Результаты исследования

В процессе разностороннего анализа литературных данных и обработки фактического материала, собранного в период многолетних полевых исследований, были прослежены основные закономерности современного антропогенного воздействия на разные типы экосистем на территории российской и монгольской частей бассейна Байкала.

Деградация пастбищных экосистем. Исследование пастбищной дигрессии растительного покрова в основных типах степей (горно-луговые, настоящие, сухие) и интразональных полугидроморфных сообществах на МП и КУ показали неоднородность ее характера и скорости протекания в северной (российской) и южной (монгольская) частях бассейна Байкала.

Таблица. Ландшафтно-экологические характеристики модельных полигонов и ключевых участков бассейна оз. Байкал.

Название объекта (административное положение)	**Площадь (км^2) / масштаб**	**Положение в системе ландшафтного районирования**	**Название ландшафта**	**Задачи исследований**
1	**2**	**3**	**4**	**5**
I. МП «Баргузин», (Бурятия, Курумканский район)	1057.2 / 1:200000	Прибайкальская горнотаежная и котловинная провинция. Байкало-Джугджурская горно-таежная область	Предгорно-котловинный лесостепной с сосновыми лесами и разнотравно-злаковыми степями и залежами	Изучение структуры и состояния экосистем
1. КУ «Куйтун-1» (там же)	241.6 / 1:10000			Выявление причин высыхания сосновых лесов и лесозащитных полос (*Pinus sylvestris*[2], *Populus balsamifera*) и закоривания залежей
2. КУ «Куйтун-2» (Бурятия, Баргузинский район)	0.5 / 1:5000			Изучение структуры и состояния экосистем, выявление причин высыхания сосновых лесов
3. КУ «оз. Гусиное» (Бурятия, Селенгинский район)	364.1 / 1:10000	Селенгинско-Орхонская котловинно-среднегорная провинция. Южно-Сибирско-Хангай-Хэнтэйская горная область	Низкогорно-долинный лесостепной с сосновыми лесами, разнотравно-злаковыми степями, пойменными лугами и богарными (пахотными и залежными) землями	Изучение структуры и состояния природных и природно-техногенных экосистем, возникших при эксплуатации угольного месторождения
4. КУ «Усть-Киран» (Бурятия, Кяхтинский район)	125.5 / 1:10000			Наблюдение за состоянием сосновых насаждений и изучение деградации богарных почв
II. МП «Шамар – Дзун-Бурэн» (Монголия, Селенгинский аймак)	779.1 / 1:200000			Изучение структуры и состояния экосистем, сукцессий и процессов восстановления лесов после рубок и пожаров, распространения и приуроченности кустарниковых сообществ.
5. КУ «Шамар» (там же)	52.7 / 1:10000			Детальное изучение кустарниковых сукцессий (*Prunus sibirica*), деградации богарных почв.
6. КУ «Алтан-Булаг» (там же)	0.5 / 1:5000			Изучение долинного комплекса р. Боор и пастбищной дигрессии гидроморфных экосистем

[2] Латинские названия растений приведены по работе «The Plant List» (2013).

Продолжение таблицы.

1	2	3	4	5
III. МП «Салхит» (Монголия, аймаки Селенгинский и Дархан-Уул)	755.2 / 1:200000	Селенгинско-Орхонская котловинно-среднегорная провинция. Южно-Сибирско-Хангай-Хэнтэйская горная область	Низкогорно-долинный лесостепной с сосновыми лесами, разнотравно-злаковыми степями, пойменными лугами и богарными (пахотными и залежными) землями	Изучение структуры и состояния экосистем, постлесных сукцессий (*Caragana microphylla, Ulmus pumila, Prunus pedunculata*), деградации пахотных и залежных земель
7. КУ «Шарын-гол» (Монголия, аймак Дархан-Уул)	29.1 / 1:50000			Изучение сохранившихся сосновых лесов и детальное изучение постлесных сукцессий (*Dasiphora fruticosa*)
8. КУ «Борнур» (Монголия, Центральный аймак)	0.45/ 1:5000		Низкогорный лесостепной	Изучение структуры и состояния, экосистем, детальное изучение кустарниковых сообществ с *Dasiphora fruticosa*
9. КУ «Зэлтэр» (Монголия, Селенгинский аймак)	2.1 / 1:10000	Джидинско-Хамар-Дабанская горнотаежная и котловинная провинция. Южно-Сибирско-Хангай-Хэнтэйская горная область	Низкогорный лесостепной с лиственничными и производными лесами	Изучение структуры и состояния экосистем, особенностей сукцессий древесно-кустарниковой растительности (*Betula pendula, Spiraea media*)
IV. МП «Тосонцэнгэл» (Монголия, Завханский аймак)	1371.7 / 1:200000	Хангайская нагорная горно-таежная и горно-луговая сухостепная провинция. Южно-Сибирско-Хангай-Хэнтэйская горная область	Среднегорный горно-таежный, горностепной с лиственничными сильно-нарушенными лесами, кустарниковыми зарослями и полынно-лапчатково-злаковыми деградированными степями	Изучение структуры и состояния экосистем на границе бассейна Байкала и ЦА бессточного бассейна. Изучение инвазий *Caragana bungei, C. spinosa*
V. МП «Сэргэлэн», (Монголия, Центральный аймак)	920.2 / 1:200000	Онон-Хэнтэйская котловинно-горнотаежная провинция. Южно-Сибирско-Хангай-Хэнтэйская горная область	Среднегорно-котловинный лесостепной с лиственничниками и осиново-березовыми сильно нарушенными лесами, ...	Изучение структуры и состояния экосистем на водоразделе бассейна Байкала и р. Амур и переходной зоны от лесостепи к сухим степям

Продолжение таблицы.

1	2	3	4	5
10. КУ «Налайх» (там же)	27.9 / 1:10000	Онон-Хэнтэйская котловинно-горнотаежная провинция. Южно-Сибирско-Хангай-Хэнтэйская горная область	... кустарниковыми зарослями, разнотравными лугами и разнотравно-злаковыми степями	Изучение сукцессии березы бурой (*Betula ovalifolia*) в структуре растительности лесных и кустарниковых экосистем. Определение возможностей восстановления древостоев
11. КУ «Дзун-Мод» (там же)	17.8 / 1:10000			
12. КУ «Шахта», (там же)	0.1 / 1:5000			Детальное изучение восстановления растительности на отвалах горнодобывающей промышленности
VI. МП «Унджул» (Монголия, Центральный аймак)	1651.75 / 1:200000	Селенгинско-Орхонская котловинно-среднегорная провинция. Южно-Сибирско-Хангай-Хэнтэйская горная область	Низкогорно-сопочный с фрагментами лесостепи и равнинный сухостепной	Изучение структуры и состояния экосистем на границе бассейна Байкала и Центрально-Азиатского бессточного бассейна. Изучение инвазий *Ephedra sinica, Allium polyrhizum*

Незначительные пастбищные нагрузки, связанные с низким поголовьем домашнего скота в исследованных ландшафтах Забайкалья, практически привели к замедлению дигрессии, а в ряде регионов Бурятии стимулировали процесс восстановления пастбищной растительности. Так, на исследуемых территориях в настоящее время степная растительность представлена средненарушенными злаковыми (*Poa attenuata*, *Stipa krylovii*) сообществами – на КУ «Куйтун-1», разнотравно-дерновиннозлаковыми сообществами – на МП «Баргузин» и КУ «Куйтун-2», осочково-разнотравными (*Carex duriuscula*, *Lespedeza davurica*, *Potentilla tanacetifolia*, *P. acaulis*) и дерновиннозлаковыми (*Koeleria macrantha*, *Poa botryoides, Stipa baicalensis*), дерновиннозлаково-мелкотравно-карагановыми (*Caragana microphylla*) и осочково-мелкотравными (*C. duriuscula*) сообществами – на КУ «Куйтун-2», крыловоковыльно-разнотравными (*Stipa krylovii*) сообществами – на КУ «оз. Гусиное», где довольно хорошо сохранилось участие коренных дерновинных злаков в структуре растительных сообществ. Участки степей со слабой степенью нарушенности обнаружены на периферии лесных массивов КУ «Куйтун-1» и занимают не более 0.5% от площади ключевого участка. Незначительную площадь занимают и сильно нарушенные полынно (*Artemisia frigida, A. scoparia*) – осочковые (*Carex duriuscula, C. korshinskyi*) сообщества настоящих степей на КУ «Куйтун-2».

Интразональная растительность речных долин (пойменные луга) и озерных депрессий на обследованных территориях российской части бассейна Байкала также слабо и средне нарушена благодаря использованию в качестве сенокосов и для умеренного выпаса.

Резкий рост поголовья выпасаемого на пастбищах скота на территории Монголии и, соответственно, превышение в 2-2.5 раза норм нагрузки на растительные ресурсы пастбищ коренным образом изменили их видовой состав и приблизили их состояние к критическому. Антропогенная динамика пастбищных экосистем в южной части бассейна Байкала отличается прогрессирующим развитием пастбищной дигрессии, охватывающей все большие площади. На данный момент наиболее широко распространены средне- и сильнонарушенные пастбища, на которых коренная степная растительность заменена менее продуктивными сообществами с преобладанием сорных и непоедаемых видов. Нередко наблюдается конвергенция признаков растительного покрова, связанная

с его общей ксерофитизацией и активизацией деятельности животных-землероев в условиях увеличения нагрузки на пастбища. В результате, на б**о**льшей части площадей естественных кормовых угодий преобладают сходные по структуре и составу обедненные сообщества, сформировавшиеся на месте коренных степных фитоценозов. Как правило, это низкорослые холоднополынно-лапчатковые, змеевково-твердоватоосочковые с караганами (*Caragana microphylla*, *C. stenophylla*), змеевково-адамсовополынные, иногда с участием ксерофитных ковылей (*Stipa krylovii, S. baicalensis*) фитоценозы (МП «Салхит», «Сэргэлэн», «Унджул», «Тосонцэнгэл», КУ «Борнур», «Дзун-Мод», «Налайх»).

Наиболее распространенным процессом дигрессии в разнотравно-злаковых и злаковых степных пастбищах является их закустаривание. Основную роль при этом играют кустарниковые виды рода *Caragana* (*C. bungei*, *C. pygmaea*, *C. microphylla*, *C. stenophylla*), а также *Prunus pedunculata*, *P. sibirica* и полукустарничковые виды полыни (*Artemisia adamsii*, *A. frigida*; МП «Унджул», «Тосонцэнгэл», «Сэргэлэн», «Салхит», КУ «Шамар» и др.).

Результаты исследований экосистем МП «Унджул» позволяют говорить о протекающих в растительном покрове трансграничных взаимодействиях, в том числе антропогенно стимулируемых. Сам характер таких взаимодействий инвазийный, связанный с проникновением пустынно-степных видов – эфедры китайской (*Ephedra sinica*) и лука многокорневого (*Allium polyrhizum*). Так, в последнее время здесь резко увеличилась доля полностью трансформированных сухостепных пастбищ, на месте которых формируются монодоминантные растительные сообщества из *Ephedra sinica*. Картографирование полигона показало, что растительные сообщества, в состав которых входит эфедра, занимают более 1/3 территории (Гунин и др., 2012). Кроме того, было выявлено увеличение участия в структуре растительных сообществ и *Allium polyrhizum,* получившего значительное развитие за последние 25-30 лет в сильно деградированных сухостепных сообществах Среднегобийского аймака (Бажа и др., 2015; Гунин и др., 2015а). Сам процесс внедрения этих видов стимулируется интенсивным выпасом, приводящим к уменьшению роли коренных видов. Это приводит к полной непригодности сообществ для выпаса скота в виду высокого содержания токсических аминокислот и алкалоидов.

Фоновым и слабо нарушенным состоянием были охарактеризованы лишь небольшие участки степных и луговых экосистем на КУ «Зэлтэр», находящемся в охраняемой пограничной зоне на границе Монголии и России.

Максимальные пастбищные нагрузки испытывают пастбища гидроморфных и полугидроморфных луговых и лугово-степных экосистем, приуроченных к долинам рек, озерным впадинам и замкнутым слабо дренированным понижениям. Наиболее распространенными здесь являются ирисово-злаковые, разнотравно-злаковые, злаковые, осоково-злаково-разнотравные на аллювиально-луговых почвах, вострецовые на аллювиально-дерновых, преимущественно суглинисто-щебнистых почвах и чиевые ассоциации на солонцеватых почвах (Экосистемы …, 2005). На сильно нарушенных участках в настоящее время сформировались осочковые (*Carex duriuscula*), злаково-осочковые, осочково-гусинолапчатковые (*Potentilla anserina*; МП «Салхит»), осочково-ирисовые и сорнотравно-ирисовые (*Iris lactea*.), полынные (*Artemisia adamsii*, *A. laciniata*) и лапчатковые (*Potentilla acaulis*) сообщества (МП «Шамар-Дзун-Бурэн», КУ «Алтан-Булаг», «Налайх»), сложенные относительно небольшим числом видов.

Обезлесивание. Значительную опасность для экологической стабильности бассейна Байкала представляет обезлесивание. Современная динамика лесных экосистем на большей части их распространения в горнолесных и лесостепных ландшафтах бассейна определяется комплексным воздействием пожаров и промышленных рубок, обуславливающим в сумме крайне высокую степень антропогенной нагрузки.

Однако, в северной части бассейна Байкала драматическая ситуация с сосновыми лесами сложилась под воздействием климатического фактора. Здесь, в Баргузинской котловине на КУ «Куйтун-1», за очень короткий период произошла гибель естественных массивов соснового леса, имеющих окраинный или островной характер. Как показали результаты наших исследований, это было вызвано резким снижением выпадения атмосферных осадков в 2013-2016 гг. и последующим иссушением корнеобитаемого слоя почвогрунтов. Сильное иссушение почв сказалось и на состоянии искусственных полезащитных лесополос из *Pinus sylvestris* и *Populus balsamifera* (Убугунов и др.,

2017). Гибель сосновых лесов отмечалась на значительной территории, этот же процесс мы наблюдали и в 40 км южнее на склонах юго-восточной экспозиции Баргузинского хребта на КУ «Куйтун-2». Таким образом, данный процесс носит региональный характер и позволяет констатировать, что в условиях лесостепной зоны северного Забайкалья сложились такие экологические условия, когда даже сосна обыкновенная, считающаяся устойчивой к засухам по сравнению с другими породами, не выдерживает подобные изменения. Иссушение почв отмечалось и в других ландшафтах Байкальского региона, что тем более было чувствительно для мезофитных древесных видов. Так, на юге Бурятии на КУ «Усть-Киран» были обнаружены ветрозащитные лесополосы из полностью высохшего *Populus laurifolia*, тогда как полосы в аналогичных условиях из более ксерофитного кустарника *Caragana arborescens* находились в удовлетворительном состоянии (Гунин и др., 2017).

В южной части бассейна особенно ярко и быстро проявляются процессы деградации лесов, связанные с замещением коренных насаждений чистыми или смешанными зарослями ксерофитных, мезоксерофитных и ксеромезофитных кустарников: миндаля черешкового (*Prunus pedunculata*), спирей (*Spiraea hypericifolia* и *S. media*), абрикоса сибирского (*Prunus sibirica*), березы бурой (*Betula ovalifolia*), курильского чая (*Dasiphora fruticosa*) и караган (*Caragana bungei*, *C. microphylla*, *C. spinosa*), либо на месте леса образуется степь. Эти сообщества являются сильно нарушенными. Среди факторов, способствующих обезлесению, необходимо выделить такие изменения ландшафтно-экологических условий в лесных экотопах, лишенных коренной бореальной растительности или резко снизивших свое значение, как иссушение и переувлажнение корнеобитаемого слоя почвогрунтов, а также конкурентные отношения между древесной и кустарниковой растительностью (Гунин и др., 2017; Бажа и др., 2018, 2019, 2020). В разных частях бассейна эти факторы действуют как относительно изолированно, так и в различных комбинациях.

Так, на МП «Шамар-Дзун-Бурэн» и КУ «Шамар» при многолетних исследованиях был выявлен четкий тренд к сукцессионной смене сосновых лесов на кустарниковые сообщества из *Prunus sibirica*. К настоящему времени на КУ «Шамар» практически все экотопы на склонах западной и восточной экспозиции полностью заняты крупнокустовыми сообществами из абрикоса с проективным покрытием до 40-60%. В качестве свидетельств былого распространения сосновых лесов служат фрагменты абрикосовых сосняков или абрикосников с редкостойными соснами. Разрастание этого кустарника приводит к практически полному использованию влагозапаса, накопившегося в почвогрунтах вследствие выпадения атмосферных осадков и таяния снежного покрова, что затрудняет восстановление хвойных лесов в густых абрикосниках и говорит о постепенном вытеснении сосны более адаптированным к аридизации климата абрикосом сибирским (Бажа и др., 2020).

На КУ «Налайх», представляющем юго-западные отроги хребта Хэнтэй, к настоящему времени все бывшие массивы лиственничных лесов, приуроченные к циркообразным западинам, террасовидным уступам и пологим шлейфам, уступили свои экотопы ерниковым сообществам из березы бурой (*Betula ovalifolia*). Оставшиеся массивы средневозрастного леса представлены фрагментированными участками, вкрапленных в массивы низкорослых березняков. Сообщества, сложенные *Betula ovalifolia,* занимают около 85% всей лесопокрытой площади участка и имеют четкую приуроченность к склонам северной, северо-западной и северо-восточной экспозиции. Наличие зарослей этой березы указывает на достаточно холодные, избыточно влажные почвы. Зимой, во время снегопадов, ветровой поток, проходя над зарослями кустарниковой березы, сильно тормозится, сугробы здесь могут превышать 1 м, тогда как в лиственничнике они значительно ниже или вообще отсутствуют. В результате в этих зарослях образуются большие запасы влаги, которые весной насыщают почву. Высокие значения влажности поверхностных почвогрунтов, близкие к полному насыщению влагой, препятствуют возобновлению здесь лиственницы сибирской. Расчет площадей экосистем с такими условиями показывает, что на этом ключевом участке территории с потенциальными условиями для естественного возобновления этой породы уменьшились на 50-60% именно вследствие повышенной влажности почвогрунтов (Бажа и др., 2016, 2019). Похожие сообщества из *Betula ovalifolia* были обнаружены нами и на КУ «Дзун-Мод». Таким образом, сукцессии, связанные с развитием ерниковых сообществ на месте лиственничных лесов характерны для значительной территории, относящейся к юго-западным отрогам Хэнтэя.

В зависимости от природно-климатических условий и характера антропогенных нагрузок

кустарниковые сукцессии идут различными путями. На МП «Салхит» были выявлены закономерности развития лесных экосистем на песчаных массивах, нарушенных рубками и подверженных обезлесению. Здесь восстановление древесной растительности значительно осложняется активными эоловыми процессами на вырубках, нередко приводящими к формированию на месте леса массивов подвижных песков. В случае, если исходная экосистема все же восстанавливается, этот процесс занимает довольно значительное время (более 100 лет), причем зарастание песков может идти двумя путями, однако, как правило, без смены пород, но со значительным участием вяза мелколистного. На первых этапах восстановления ведущая роль всегда принадлежит пионерам-псаммофитам, группировки которых в дальнейшем могут смениться либо остепненными травяными сообществами, либо довольно густыми кустарниковыми зарослями из *Caragana microphylla* и *Prunus pedunculata*. Восстановление леса в таких зарослях возможно только при изреживании кустарникового яруса, лимитирующего влагообеспеченность прорастания семян деревьев и развития подроста.

На низкогорных массивах МП «Салхит» на склонах северной экспозиции выявлены постлесные кустарниковые сообщества с разнообразными лесными видами (спирея средняя, береза повислая, шиповник и др.), индицирующими существование в исторический период экосистем сосновых и лиственничных островных лесов. Свидетельством былого распространения на этой территории лесостепного ландшафта служат мозаично встречающиеся отдельные деревья и их группы из сосны обыкновенной, приуроченные к скальным останцовым возвышенностям.

Более выраженные варианты постлесных сукцессий и сохранившиеся сосновые леса были изучены на КУ «Шарын-гол», расположенном на одинаковой с МП «Салхит» широте и в той же Селенгинско-Орхонской провинции. Более половины лесных экосистем этого КУ нарушены выпасом и рубкой, а в подлеске отмечено большое участие курильского чая *Dasiphora fruticosa*. Обычно этот светолюбивый мезофитный кустарник произрастает по опушкам и в «окнах» древостоя, а в случае изреживания насаждений проникает под полог леса, где, активно разрастаясь, создает конкуренцию для подроста. В настоящее время произрастающие здесь сосновые леса практически не самовозобновляются. Подобная ситуация регистрировалась в том числе и на КУ «Борнур». В будущем лесные сообщества этих участков могут полностью смениться кустарниковыми из *Dasiphora fruticosa*. Однако здесь возможно искусственное возобновление леса в результате сложившихся благоприятных условий почвенного увлажнения под зарослями курильского чая. Таким образом, заросли курильского чая служат индикатором пригодности для произрастания леса (Гунин и др., 2017).

На западной периферии монгольской части бассейна Байкала на МП «Тосонцэнгэл» характер протекания деградационных процессов определяется трансграничным взаимодействием с ландшафтами Центрально-Азиатского бессточного бассейна и во многом обусловлен значительным распространением песчаных массивов, а также широтным направлением основных потоков ветра, переносящих и переотлагающих песок, выдуваемый из Котловины Больших Озер. Результатом суммарного воздействия эоловых процессов и пастбищной дигрессии стало распространение псаммофильного пустынно-степного кустарника караганы Бунге (*Caragana bungei*), что привело в свою очередь к формированию на пастбищах карагановых зарослей с высоким покрытием этого кустарника. С этих трансформированных пастбищ карагана проникает и под полог леса, что приводит к формированию уникального типа лесных сообществ, где древесный ярус представлен таежным видом (*Larix sibirica*), а кустарниковый – пустынно-степным (*Caragana bungei*). Этот вид кустарника может представлять собой серьезную угрозу, препятствующую возобновлению лиственничных лесов Монголии, произрастающих в жестких условиях существования ввиду недостатка влаги и питательных элементов, резких колебаний погоды, пастбищного пресса, пожаров, незаконных рубок, вспышек насекомых-вредителей (Гунин и др., 2015а, 2017).

Здесь же на западной границе бассейна Байкала в отдельных случаях наблюдается смена лиственничных лесов зарослями караганы колючей (*Caragana spinosa*), светлолюбивого ксеромезофитного кустарника. Исследования почвенной влажности под разными местообитаниями и требовательность *Caragana spinosa* к влаге позволяют сделать вывод о том, что этот кустарник может маркировать экотопы, пригодные для искусственного лесоразведения (Гунин и др., 2016).

Деградация богарных земель. Хозяйственное использование агроэкосистем в пределах обеих исследованных частей бассейна Байкала сопровождается ярко выраженными деградационными

процессами. Главными диагностическими признаками почвенной деградации сильнонарушенных богарных земель являются процессы дегумификации, потеря мелкозема в пахотных горизонтах и усиление опесчаненности поверхностных горизонтов почвы. Степень проявления этих процессов во всех разновидностях каштановых почв зависит от расположения распаханных залежных участков в различных типах ландшафтов и определяется литологическим составом почв и их положением по отношению к ветровому режиму.

Самыми значительными показателями дегумификации (до 50-60%) и снижения мелкозема (до 40-50%) характеризуются выделы экосистем с каштановыми почвами легкого гранулометрического состава (песчаные и супесчаные) в ландшафтах умеренно-сухих степей (КУ «Куйтун-1» и «Усть-Киран», МП «Салхит»). Несмотря на относительно длительный период нахождения распаханных земель в залежном состоянии, формирование сообществ из бывших доминантных видов происходит замедленными темпами. На КУ «Усть-Киран» стадия сорных и однолетних видов полыней и разнотравья уже пройдена, и в настоящее время растительный состав представлен мелкой мозаикой из монодоминантных парцелл. На КУ «Куйтун-1» зарастанию залежей высшей растительностью препятствует образовавшийся на поверхности мохово-лишайниковый покров. Процесс «закоривания почв», обнаруженный нами в экосистемах, приводит не только к особому типу деградации пастбищной растительности, но способствует истощению ее водного потенциала (Гунин и др., 2018).

Все щебнистые разновидности почв отличаются процессами «гаммадизации» поверхности, приводящими к снижению водного потенциала ландшафтов сухих степей (МП «Сэргэлэн» и «Унджул»). Основным диагностическим признаком деградации каштановых почв на залежах, наиболее четко проявляющимся в сухих степях, является выдувание и плоскостной смыв мелкозема из гумусового горизонта. Как и в других типах местности, это приводит к уменьшению гумусовых горизонтов. В то же время, необходимо отметить, что данный процесс на суглинисто-щебнистых почвах сухих степей менее выражен и приводит к укорачиванию почвенного профиля всего на 5-6 см, что связано с формированием щебнисто-каменистого панциря, который играет защитную функцию от выноса мелкозема из нижележащих горизонтов.

Средними значениями дегумификации (до 30-50%) и снижением содержания мелкозема (до 20-40%) отличаются выделы экосистем с каштановыми легкосуглинистыми почвами, которыми характеризуются ландшафты умеренно-влажных степей (МП «Салхит»). И, наконец, самыми незначительными процессами деградации почвенного покрова богарных земель с дегумификацией, не превышающей 5-10%, характеризуются выделы экосистем с каштановыми почвами лессовидного среднесуглинистого состава, относящиеся к ландшафтам умеренно-влажных степей и лесостепей (МП «Шамар-Дзун-Бурэн», КУ «Шамар»; Бажа и др., 2018).

При этом, проблема деградации пахотных земель с почвами легкого (супесчано-песчаного) гранулометрического состава особенно остро стоит как на территории Бурятии, так и Монголии, поскольку природные условия здесь весьма неблагоприятны для развития земледелия, а используемые в хозяйстве технологии и приемы стимулировали негативные экзогенные процессы, как это было зарегистрировано на КУ «Куйтун-1», «Усть-Киран» и на МП «Салхит».

В последнее время наблюдается тенденция к увеличению площади залежей в связи с выводом истощенных земель из хозяйственного использования и произошедшей структурной перестройкой сельского хозяйства. Современная динамика залежных земель характеризуется преобладанием процессов расселения сорно-рудеральных растений, которое в настоящее время приобрело в ряде регионов угрожающие масштабы. Экспансия синантропных видов влечет за собой, в том числе, социальные проблемы, и создает значительную угрозу для общества, обусловленную тем, что некоторые из таких растений содержат наркотические вещества (алкалоиды, гликозиды). Это касается, прежде всего, конопли (*Cannabis sativa*), которая господствует в составе фитоценозов на залежных землях Северной Монголии (МП «Шамар−Дзун-Бурэн» и «Салхит») и приграничных районах Бурятии (КУ «Усть-Киран»).

Изучение техногенных ландшафтов. Из всех видов хозяйственного освоения территорий разработка месторождений полезных ископаемых вызывает наиболее значительные изменения природной среды, затрагивающие все компоненты ПТК. Возникающие при разработках месторождений карьеры, шахты, отвалы, загрязнение воздуха и поверхностных и подземных вод создают неблагополучную экологическую обстановку. Так, на КУ «оз. Гусиное» отвалы вскрышных

пород Холбольджинского угольного разреза, растянутые почти на 9 км вдоль восточного берега озера, загрязняют само озеро, снабжающее населенные пункты водой. Кроме того, происходит и загрязнение воздуха при пылении отвалов и разгорающихся углей внутри них. В настоящее время здесь проводятся лесо- и агромелиоративные мероприятия, поэтому этот участок представляет собой интерес с точки зрения изучения возможностей экологической реабилитации техногенно-измененных экосистем, что требует исследования структуры, условий функционирования и динамики формирующихся природно-техногенных систем. На отвалах нами было выделено 12 рудеральных группировок: гусинолапчатково-житняковая, полынно-житняковая, холоднополынная, твердоватоосоковая, тростниковая и др.

В монгольской части бассейна был исследован КУ «Шахта» на территории Налайхского буроугольного месторождения, промышленная разработка которого в настоящее время также прекращена, но добыча продолжается частным образом путем стихийно возникающих мини-шахт глубиной 5-15 м, уголь из которых извлекается вручную нелегальными углекопами. Экосистемы участка практически полностью утратили естественный рельеф, почвенный и растительный покров. Они нуждаются в срочной глубокой рекультивации. Растительность этого участка состоит из различных группировок растений, образующих комбинации на техногенных буграх и межбугорных пространствах. Восстановительные процессы дополнительно осложняются выпасом скота. Они характеризуются 7 стадиями, которые начинаются с первичных группировок змееголовниково-солянковой на буграх, маревой и вьюнковой на межбугорных пространствах. Далее продолжаются в направлении полынных и вострецовых стадий, заканчиваясь дигрессионным холоднополынно-твердоватоосоковым вариантом ковыльных степей.

Выводы

В результате многолетних исследований ландшафтов бассейна оз. Байкал были прослежены основные закономерности современного антропогенного воздействия на разные типы экосистем на территории российской и монгольской частей. При этом проведена комплексная инвентаризация экосистем, дана оценка степени их нарушенности, выявлены главные деградационные процессы, определяющие их структуру и функционирование, и детально изучены механизмы их воздействия.

Среди видов хозяйственной деятельности, оказывающих влияние на структуру и функционирование ландшафтов бассейна, ведущая роль принадлежит экстенсивным видам природопользования: животноводству, лесному хозяйству и земледелию, а также горнодобывающей отрасли.

Антропогенная динамика пастбищных экосистем на территории монгольской части бассейна отличается прогрессирующим развитием пастбищной дигрессии, охватывающей все большие площади. Здесь резко увеличилась доля полностью трансформированных пастбищ, на месте которых формируются монодоминантные растительные сообщества из инвазийных видов. На данный момент наиболее широко распространены средне- и сильнонарушенные пастбища, на которых коренная степная растительность уже заменена менее продуктивными сообществами с преобладанием сорных и непоедаемых видов.

В российской части бассейна Байкала снижение численности поголовья скота привело к замедлению процессов пастбищной дигрессии и к восстановлению растительного покрова пастбищ. С другой стороны, появление на значительных территориях бесхозных пастбищ после упразднения коллективных хозяйств приводит на отдельных площадях к их непрофильному использованию.

По всему бассейну Байкала происходит направленное сокращение общей площади лесов, вызванное необратимыми сменами растительного покрова на гарях, вырубках и участках лесов, погибших от насекомых, которое ведет к формированию травяных и кустарниковых сообществ, и, следовательно, к закустариванию и остепнению лесопригодных экотопов. Особенно яркие и быстрые темпы деградации лесов были обнаружены нами на КУ «Налайх», «Шарын-гол», «Шамар» и КУ «Куйтун-1».

Распашка земель в обеих частях бассейна происходила крупными массивами, без учета ландшафтной структуры территории, литологического состава почв и положения относительно ветрового режима, поэтому деградация богарных почв сопровождается истощением плодородия почв, развитием эрозии и локально – опесчаниванием. При этом значительным деградационным

процессам подвержены почвы легкого (супесчано-песчаного) гранулометрического состава. В настоящее время большая часть земель российской части бассейна переведена в залежи, находящиеся на разных стадиях восстановления.

За последние десятилетия увеличилась площадь техногенных экосистем, связанных с разработкой полезных ископаемых. Естественное восстановление таких экосистем растянуто во времени, а рекультивационные работы на отвалах горнодобывающей промышленности часто проводятся с большим опозданием и в недостаточном объеме. В результате этого формируются значительные участки, не только непригодные для хозяйственной деятельности, но и создающие опасность для здоровья населения даже при невысоком классе опасности отходов угледобывающей отрасли.

Таким образом, проведенные исследования позволили нам выделить на территории бассейна Байкала следующие основные экологические проблемы, возникающие в результате интенсификации антропогенных воздействий:

- инвазии опасных видов растений (внедрение алкалоидных растений *Artemisia adamsii, Cannabis sativa, Ephedra sinica*);
- закустаривание пастбищных степных экосистем (замещение типичных доминантных видов трав кустарниками и полукустарничками *Artemisia adamsii, A. frigida, Caragana bungei, C. microphylla, C. stenophylla, Prunus pedunculata* и др.);
- обезлесивание (формирование на вырубках и гарях бореальных лесов кустарниковых сообществ из *Betula ovalifolia, Caragana bungei, C. microphylla, C. spinosa, Dasiphora fruticosa, Prunus pedunculata, P. sibirica, Spiraea hypericifolia, S. media*);
- опустынивание экосистем с песчано-щебнистыми почвами (разрушение дернового горизонта и формирование эолового рельефа с пустынно-степными псаммофитами: *Agriophyllum squarrosum, Allium polyrhizum, Corispermum mongolicum, Peganum nigellastrum*, *Psammochloa villosa*;
- обеднение пастбищных сообществ гидроморфных экосистем и разрастание малопоедаемых и непоедаемых видов: *Artemisia adamsii, A. commutata, A. laciniata, Carex duriuscula, Iris lactea, Potentilla acaulis* и др. в деградированных экосистемах;
- формирование «бедлендов» на территориях горнодобывающей отрасли и локальных зон с неблагополучной экологической обстановкой.

Проведенные исследования по крупномасштабному ландшафтно-экологическому картографированию модельных полигонов и ключевых участков бассейна Байкала позволили охватить основные типы наземных экосистем и составить не только их инвентаризационный перечень, но и определить пространственное распределение факторов и процессов их дестабилизации, дифференцировать участки экосистем, находящиеся на разных стадиях дестабилизации, а также провести детализацию механизмов развития этих процессов.

Для целей развития сети станций фонового мониторинга в Байкальском регионе подготовлена детальная цифровая картографическая база, которая может служить в настоящий период «нулевой точкой отсчета» для последующей оценки состояния экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антропогенная трансформация природных систем и социально-экономические последствия в бассейне р. Селенги. 2012 / Ред. Б.Л. Раднаев. Улан-Удэ: Изд-во БГУ. 260 с.

Бажа С.Н., Басхаева Т.Г., Гунин П.Д., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Дугаржав Ч. 2019. Основные пути обезлесения лесостепных ландшафтов на южной границе бореальных лесов в Монголии // Лесной вестник. Т. 23. № 2. С. 45-54.

Бажа С.Н., Басхаева Т.Г., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Иванов Л.А., Иванова Л.А., Мигалина С.В., Рупышев Ю.А., Убугунова В.И., Богданов Е.А., Хадбаатар С., Цыремпилов Э.Г., Цэрэнханд Г., Шинэхуу Т. 2020. Эколого-биологические особенности распространения абрикоса сибирского (*Prunus sibirica* L.) в южной части бассейна р. Селенга // Аридные экосистемы. Т. 26. № 4 (85). С. 3-13. [Bazha S.N., Baskhaeva T.G., Danzhalova E.V., Drobyshev Yu.I., Ivanov L.A., Ivanova L.A., Migalina S.V., Rupyshev Yu.A., Ubugunova V.I., Bogdanov E.A., Khadbaatar S., Tsyrempilov E.G., Tserenkhand G., Shinekhuu T. Ecological and Biological Features of the Distribution of the Siberian Apricot (*Prunus sibirica* L.) in the Southern Part of the Selenga River Basin // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 1. P. 284-292.]

Бажа С.Н., Востокова Е.А., Гунин П.Д., Дугаржав Ч., Данжалова Е.В., Воробьев К.А., Прищепа А.В., Петухов И.А. 2013. Геоинформационное картографирование наземных экосистем бассейна Селенги на

примере модельных участков. Методические рекомендации. М: Россельхозакадемия. 109 с.

Бажа С.Н., Гунин П.Д., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Казанцева Т.И., Ариунболд Э., Мягмарсурэн Д., Хадбаатар С., Цэрэнханд Г. 2015. Инвазийные сукцессии как индикатор опустынивания сухих степей на примере Центральной Монголии // Российский журнал биологических инвазий. Т. 8. № 3. С. 2-21.

Бажа С.Н., Балданов Б.Ц., Басхаева Т.Г., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Дугаржав Ч., Концов С.В., Убугунова В.И., Хадбаатар С., Гунин П.Д. 2016. Диагностические признаки лесовосстановительного потенциала *Larix sibirica* Ledeb. в экосистемах на южной границе бореального пояса Азии // Аридные экосистемы. Т. 22. № 3 (68). С. 32-41. [*Bazha S.N., Baldanov B.Ts., Baskhaeva T.G., Danzhalova E.V., Drobyshev Yu.I., Dugarjav Ch., Kontsov S.V., Ubugunova V.I., Khadbaatar S., Gunin P.D.* 2016. Diagnostic features of reforestation potential of *Larix sibirica* Ledeb. in ecosystems at the southern boundary of the boreal belt in Asia // Arid Ecosystems. Vol. 6. No. 3. P. 169-176.]

Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Хадбаатар С. 2018. Трансформация наземных экосистем южной части бассейна Байкала. М.: КМК. 2018. 402 с.

Бешенцев А.Н. 2008. Геоинформационная оценка природопользования. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 120 с.

Виноградов Б.В. 1984. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука. 320 с.

Востокова Е.А., Гунин П.Д., Казанцева Т.И., Прищепа А.В., Бажа С.Н. 2004. Региональный экологический мониторинг на основе крупномасштабного картографирования экосистем // Аридные экосистемы. № 3. С. 103-116.

Герасимов И.П. 1975. Научные основы современного мониторинга окружающей среды // Известия АН СССР. Серия «Географическая». № 3. С. 13-25.

Гомбоев Б.О. 2006. Аграрное землепользование Внутренней Азии. Новосибирск: СО РАН. 225 с.

Гунин П.Д., Бажа С.Н., Балданов Б.Ц., Басхаева Т.Г., Дробышев Ю.И., Хадбаатар С., Цыремпилов Э.Г. 2016. Роль и значение *Caragana spinosa* в постлесных сообществах западного мегасклона Хангайского нагорья // Экосистемы Центральной Азии: исследование, сохранение, рациональное использование. Материалы XIII Убсунурского международного симпозиума. Кызыл: Изд-во ТувГУ. С. 33-37.

Гунин П.Д., Бажа С.Н., Балданов Б.Ц., Басхаева Т.Г., Дробышев Ю.И., Дугаржав Ч., Концов С.В., Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Хадбаатар С., Цыремпилов Э.Г. 2017. Обезлесение – одна из важнейших экологических проблем бассейна озера Байкал // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1. № 3. С. 38-99. [Электронный ресурс http://ecosystemsdynamic.ru/wp-content/uploads/2017/09/3-Гунин-статья.pdf (Дата обращения 06.09.2020)].

Гунин П.Д., Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Дмитриев И.А., Дробышев Ю.И., Казанцева Т.И., Микляева И.М., Огуреева Г.Н., Слемнев Н.Н., Титова С.В., Ариунболд Э., Батцэрэн Ц., Жаргалсайхан Л. 2012. Распространение *Ephedra sinica* в экосистемах сухих степей Восточной и Центральной Монголии // Аридные экосистемы. Т. 18. № 1. С. 18-25. [*Gunin P.D., Bazha S.N., Danzhalova E.V., Dmitriev I.A., Drobyshev Yu.I., Kazantseva T I., Miklyaeva I.M., Ogureeva G.N., Slemnev N.N., Titova S.V., Ariunbold E., Battseren C., Jargalsaikhan L.* 2012. Expansion of *Ephedra sinica* Stapf. in the arid steppe ecosystems of Eastern and Central Mongolia // Arid Ecosystems. Vol. 2. No. 1. P. 18-33.]

Гунин П.Д., Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Иванов Л.А., Иванова Л.А., Казанцева Т.И., Мигалина С.В., Микляева И.М., Ронжина Д.А., Ариунболд Э., Хадбаатар С., Цоож Ш., Цэрэнханд Г. 2015а. Региональные особенности процессов опустынивания экосистем на границе бассейна Байкала и Центральноазиатского бессточного бассейна // Аридные экосистемы. Т. 21. № 3 (64). С. 5-22. [*Gunin P.D., Bazha S.N., Danzhalova E.V., Drobyshev Yu.I., Ivanov L.A., Ivanova L.A., Kazantseva T.I., Migalina S.V., Miklyaeva I.M., Ronzhina D.A., Ariunbold E., Khadbaatar S., Tsooj Sh., Tserenkhand G.* 2015. Regional features of desertification processes of ecosystems on the border of the Baikal basin and Central Asian internal drainage basin // Arid Ecosystems. Vol. 5. No. 3. P. 117-133.]

Гунин П.Д., Дугаржав Ч., Востокова Е.А., Саандарь М., Панкова Е.И., Адъяа Я., Бажа С.Н., Доржсурэн Ч., Андреев А.В., Воробьев К.А., Петухов И.А., Огуреева Г.Н., Микляева И.М., Дорофеюк Н.И., Оюунгэрэл Ж., Энхтайван Д., Оюунгэрэл Б., Даш Д. 2015б. Атлас «Экосистемы Монголии» как научная основа экологического мониторинга // Экосистемы Центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития: Материалы Международной конференции. Т. 1. Улан-Батор: “Terkhchandmani” Co., Ltd. С. 32-35.

Гунин П.Д., Убугунов В.Л., Рупышев Ю.А., Убугунова В.И., Бажа С.Н., Балсанова Л.Д., Балданов Б.Ц., Буянтуева Л.Б., Харпухаева Т.М., Холбоева С.А., Петухов И.А., Цыремпилов Э.Г. 2018. О роли биотических и абиотических факторов в процессах закоривания почв залежных земель Баргузинской котловины // Аридные экосистемы. Т. 24. № 3 (76). С. 11-24. [*Gunin P.D., Ubugunov V.L., Rupyshev Yu.A., Ubugunova V.I., Bazha S.N., Balsanova L.D., Baldanov B.Ts., Buyantueva L.B., Harpuhayeva T.M., Holboeva S.A., Petukhov I.A., Tsyrempilov E.G.* 2018. Role of Biotic and Abiotic Factors in the Processes of Soil Encrustation on Fallow Lands of the Barguzin Hollow // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 3. P. 161-172.]

Дгебуадзе Ю.Ю., Дорофеюк Н.И., Крылов А.В. (ред.) 2009. Водные экосистемы бассейна Селенги // Труды Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ. Т. 55. М.: Россельхозакадемия. 406 с.

Израэль Ю.А. 1979. Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометеоиздат. 375 с.

Методология оценки состояния и картографирования экосистем в экстремальных условиях. 1993. Пущино: Изд-во ПНЦ РАН. 203 с.

Панкова Е.И., Соловьев Д.А. 1993. Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв. М.: РАСХН. 191 с.

Снытко В.А., Коновалова Т.И., Атутова Ж.И. 2013. Геосистемы Байкальской природной территории // Актуальные эколого-географические и социально-экономические проблемы Байкальского региона и сопредельных территорий: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Улан-Удэ, 28-29 марта 2013 г. / Ред. Ц.Д. Гончиков. Улан-Удэ: Изд-во БГУ. С. 99-104.

Тулохонов А.К. 1996. Байкальский регион: проблемы устойчивого развития. Новосибирск: Наука. 208 с.

*Тулохонов А.*К. 2012. Мифы и реальность Байкальской проблемы в зеркале современных дискуссий // Вестник БНЦ СО РАН. № 1 (5). С. 17-25.

Убугунов В.Л., Гунин П.Д., Бажа С.Н., Дробышев Ю.И., Убугунова В.И. 2017. Иссушение почв как показатель опустынивания лесостепных экосистем Баргузинской котловины // Аридные экосистемы. Т. 23. № 3. С. 17-31. [*Ubugunov V.L., Gunin P.D., Bazha S.N., Drobyshev Yu.I., Ubugunova V.I.* 2017. Soil desiccation as indicator of desertification of forest–steppe ecosystems in the Barguzin depression // Arid Ecosystems. Vol. 7. No. 3. P. 142-154.]

Экологический атлас бассейна оз. Байкал. 2015. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 140 с.

Экосистемы бассейна Селенги. 2005 / Ред. Е.А. Востокова, П.Д. Гунин. М.: Наука. 359 с.

The Plant List. 2013 [Электронный ресурс http://www.theplantlist.org/ (дата обращения 5.10.2020)].

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 26-32

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 504.062.2

ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В АРИДНЫХ РЕГИОНАХ

© 2021 г. Р.М. Адамова*, М-Р. А. Казиев**

**Дагестанский государственный университет*
Россия, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 43а. E-mail: adamov45@inbox.ru
***Федеральный Аграрный научный центр Республики Дагестан,*
Россия, 367014, г. Махачкала, пр. Акушинского, Научный городок

Поступила в редакцию 07.10.2020. После доработки 01.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020.

Рассмотрены эколого-биологические аспекты создания защитных лесных насаждений. Результаты исследований могут служить основой для разработки мероприятий по рациональному использованию земельных ресурсов и созданию защитных лесонасаждений в аридных условиях. Дана оценка интродукционных ресурсов дендрофлоры для создания защитных лесных насаждений и впервые исследована микотрофность видов для определения возможностей их использования в защитных лесных насаждениях. Критерии, определяющие микотрофность древесных растений, и диагностика их устойчивости дают возможность оценить эффективность работ по интродукции и репродукции древесных пород, а также могут быть использованы при разработке общей программы восстановления естественных лесных фитоценозов.

Ключевые слова: защитные лесные насаждения, аридные территории, интродукция, лесовосстановление, микориза, сукцессия.
DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10147

Искусственное лесоразведение является одним из эффективных путей создания защитных лесных насаждений и основным элементом в комплексе мероприятий по борьбе с деградацией земельных угодий и вовлечением их в сельскохозяйственный оборот. Исследования, направленные на сдерживание процессов остепнения и опустынивания земель, имеют важное государственное значение.

Актуальность исследований состоит в необходимости выявления видового состава дендрофлоры, который может решить задачу формирования защитных лесных насаждений в аридных условиях (Семенютина, 2005).

Целью настоящей работы является разработка научной основы средообразующей и стабилизирующей функции искусственных защитных насаждений, повышение их устойчивости и долговечности, что является актуальным направлением в современной концепции устойчивого природопользования. Основное направление для достижения постоянства лесопользования и повышения устойчивости антропогенных лесов – это формирование второго поколения искусственных лесных экосистем естественным путем.

Функции микотрофности видов дендрофлоры, выявленные в результате исследований, являются основным условием решения этой проблемы и создают возможность для управления процессами, обеспечивающими интродукцию, сохранение и размножение новых видов, внедряемых в защитные лесные насаждения (Шемаханова, 1962; Лобанов, 1971).

Объекты и методы исследований

Методологической основой проведения исследований явился комплексный подход, включающий типовые методы исследований по таксации и лесоводству.

Исследования по формированию естественной смены древесных пород проводились в условиях центральной предгорной зоны Дагестана. При этом изучалось формирование лесных сообществ в различных природных фациях (островковых, прирусловых, террасных, склоновых участках) с целью

выявления устойчивого видового состава при различной степени антропогенной трансформации среды.

Объектом исследований служили также лесные насаждения в сухостепных, полупустынных районах, почвозащитные аридные редколесья Тарки-Тау и бархана Сарыкум.

Исследование проводилось на основе методик, разработанных в процессе изучения микотрофности интродуцированных видов для определения их использования в защитном лесоразведении (Шемаханова, 1962; Лобанов, 1971; Шубина, 1990).

Исследованиями планировалось изучение двух типов сукцессий (Сукачева, 1942; Лавренко,1959; West et al., 1981): 1) восстановительные смены после пожаров и 2) восстановительные смены после рубок с разработкой способа, позволяющего обеспечить прорастание семян, плодов и приживаемость сеянцев на территории после пирогенных воздействий, а также воспроизвести лесную экологическую среду с улучшенными показателями по видовому составу, ценности древесины и не древесной продукции леса.

На основе разработок отечественных исследователей на территории Ботанического сада Дагестанского государственного университета, которая расположена в аридных условиях, проводились интродукционные работы, направленные на решение общей задачи изучения новых видов древесных растений и испытание в полевых условиях их регенерационных возможностей в разных формах и стадиях развития: семена, сеянцы (лесной подрост), саженцы с выявлением оптимальных жизненных периодов в онтогенезе, при которых в полной мере проявляются признаки устойчивости (Лапин, Сиднева, 1973; Лапин и др., 1979).

В качестве интродуцентов были изучены 46 видов древесных и кустарниковых растений. В это число вошли 6 видов растений, принадлежащих к 3-м семействам из отдела Голосеменные (*Pinophyta* или *Gymnospermae*) и 40 видов растений, принадлежащих к 25 семействам и 5 подклассам из отдела Покрытосеменные (*Magnoliophyta* или *Angiospermae*).

Результаты исследований

Создание защитных лесных насаждений в регионах, подверженных в сильной степени антропогенной деградации (остепнению, опустыниванию), является сложной задачей, для решения которой необходимо изучение закономерностей взаимосвязи экологических и биологических особенностей роста и развития древесной растительности.

Получены данные по видовому разнообразию и количеству древесных пород в различных природных фациях засушливых регионов.

Элементы рельефа имеют относительно устойчивые виды, характерные для региональных условий их развития (табл. 1).

Коэффициент сходства дендрофлор (Серенсена-Чекановского) при попарном сравнении изменяется в пределах 0.36-0.40%, т. е. имеет умеренные значения (табл. 2). Из общего числа видов по всему району исследований ни один вид не отмечен более чем в двух районах. Оценка сходства дендрофлор показала, что все элементы рельефа одинаково близки по этому показателю − 0.40, 0.40 и 0.36 (Зайцев, 1984).

Максимальное видовое богатство демонстрирует терраса (15 видов), далее по рангу убывания числа видов следуют склоновые участки (13) и береговая линия (10).

Исследования по формированию лесных сообществ в различных природных фациях позволили нам установить виды растений, представляющих интерес для интродукции в сухостепные условия и внедрения их в защитные лесонасаждения. Жизненная форма растений и полученные данные фенологических наблюдений отражают комплекс адаптивных характеристик видов к определенным условиям среды (Булыгин, 1970; Зайцев, 1981).

Технология выращивания сопутствующего расширению ассортимента, представленного для защитного лесоразведения в аридных условиях, является одним из главных результатов исследований.

Одним из важных направлений была также реинтродукция автохтонов из разных природных зон региона. Группировки нагорных ксерофитов могут быть использованы для интродукции в сухостепные условия и внедрения их в защитные лесонасаждения. Отличительными их чертами являются сильная ксероморфность покрова. Вместе с сухими горными степями обнаженные склоны с

редкими группами нагорных ксерофитов образуют наиболее типичный ландшафт аридных условий. За достаточно длительный период растения этих местообитаний приобрели устойчивую адаптацию к засушливым условиям. Поэтому их интродукция в сухостепные условия является своевременным мероприятием. Экспериментально установлен видовой состав, который может решить задачу пионерного (первоначального) формирования лесных ценозов в защитных барьерных зонах (Серебряков, 1962; Черепанов, 1995).

Таблица 1. Видовой состав и смена древесных пород естественных лесных сообществ в предгорной зоне Дагестана.

Название вида	**Элементы рельефа**							
	Речной островок		**Берего-вая линия**		**Терраса**		**Склон**	
	Шт.	**%**	**Шт.**	**%**	**Шт.**	**%**	**Шт.**	**%**
Орех грецкий (*Juglas regia* L.)							4	5.1
Ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.)							3	3.8
Бук восточный (*Fagus orientalis* Lipsky)							7	8.9
Мушмула обыкновенная (*Eriobotrya germanica* L.)							3	3.8
Калина обыкновенная, или красная (*Viburnum opulus* L.)							2	2.5
Вяз гладкий, или обыкновенный (*Ulmus laevis* Pall.)							3	3.8
Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.)							6	7.6
Дуб скальный (*Quercus petraea* Mattschka L.)							2	2.5
Яблоня восточная (*Malus orientalis* Uglitzk)					**3**	**4.6**	**2**	**2.5**
Лещина обыкновенная или орешник (*Corulus avellana* L.)					**13**	**20.0**	**16**	**20.3**
Кизил обыкновенный (*Cornus mas* L.)					**4**	**6.2**	**9**	**11.4**
Граб обыкновенный (*Carpinus caucasica* Grossh)					**3**	**4.6**	**18**	**22.8**
Груша кавказская (*Pyrus caucasica* Fed.)					**2**	**3.1**	**4**	**5.1**
Боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguine* Pall.)					3	4.6		
Роза собачья (*Rosa canina* L.)					6	9.2		
Бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare* L.)					2	3.1		
Мушмула германская (*Mespilus germanica* L. Mill)			**2**	**6.5**	**5**	**7.7**		
Айва обыкновенная (*Cydonia oblonga* Mill)			**4**	**12.9**	**7**	**10.8**		
Боярышник обыкновенный (*Crataegus laevigata* (Poir) DC)			**5**	**16.1**	**4**	**6.2**		
Барбарис обыкновенный (*Berberis vulgarus* L.)			**2**	**6.5**	**3**	**10.8**		
Слива колючая (*Prunus spinosa* L.)			**2**	**6.5**	**4**	**6.2**		
Слива растопыренная (*Prunus cerasifera* Ehrh.)			6	19.4				
Ежевика сизая (*Rubus caesius* L.)			**4**	**12.9**	**6**	**9.2**		
Ива белая (*Salix alba* L.)	**30**	**3.2**	**3**	**9.7**				
Осина обыкновенная (*Populus tremula* L.)	**243**	**26.1**	**2**	**6.5**				
Тополь белый (*Populus alba* L.)	**131**	**14.1**	**1**	**3.2**				
Тополь сереющий, серый (*Populus x. canescens* Ait Smith)	50	5.4						
Тамарикс многоветвистый (*Tamarix ramosissima* Led.)	476	51.2						
Количество экземпляров (N)	930	100	31	100	65	100	79	100
Количество видов (S)	5		10		15		13	

Примечание к таблице 1: жирным шрифтом выделены связывающие виды дендрофлоры.

Использование микоризной почвы значительно ускоряет и облегчает микоризообразование (табл. 3). До внесения микоризной почвы процент зараженности сеянцев к началу октября составлял 10%, с внесением микоризной почвы он возрос до 43%.

Таблица 2. Матрица сходства состава дендрофлор предгорной зоны Дагестана.

Районы	Речной островок	Береговая линия	Терраса	Склон
Речной островок	1.00	0.40	0.00	0.00
Береговая линия	0.40	1.00	0.40	0.00
Терраса	0.00	0.40	1.00	0.36
Склон	0.00	0.00	0.36	1.00
N (видовое богатство)	5	10	15	13

Таблица 3. Характеристика роста микоризных сеянцев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) первого года.

Дата сбора корней	Сеянцы, не получившие микоризную почву			Сеянцы, получившие микоризную почву		
	Количество сеянцев	Количество микоризных сеянцев		Количест-во сеянцев	Количество микоризных сеянцев	
		Абсолютное	%		Абсолютное	%
01.08. 2015	30	0	0	30	1	3.3
30.08.2015	30	0	0	30	5	16.7
15.09.2015	30	1	3.3	30	9	30.0
07.10.2015	30	3	10.0	30	14	43.0

Комбинационное распределение 46 интродуцированных видов дендрофлоры по двум качественным признакам (степень микотрофности и тип корневой системы) и полученным значениям коэффициентов взаимной сопряженности Пирсона – 0.78, Чупрова – 0.53 показало, что между микотрофностью интродуцированных видов дендрофлоры и типом корневой системы существует тесная связь (Громыко, 2013). Учет этих закономерностей важен для разработки методов планирования защитного лесоразведения.

Сдерживающими факторами сукцессий лесных экосистем являются пожары, потепление климата, ливневый характер осадков, вспышки массового размножения непарного шелкопряда.

Лесовосстановление после катастрофических лесных пожаров обычным способом не достаточно эффективно, поскольку семена плохо всходят, сеянцы практически не приживаются, а прижившиеся слабо растут из-за отсутствия микоризообразующего грибного компонента почвы (МГКП).

Из интродуцированных видов высокую адаптационную степень проявили следующие виды: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), каркас кавказский (*Celtis caucasica* Willd.), робиния лжеакация, или белая акация (*Robinia pseudacacia* L.), конский (горький) каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum* L.), вяз гладкий, или обыкновенный (*Ulmus laevis* Pall.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior L.*), калина обыкновенная, или красная (*Viburnum opulus* L.) и др. получили высокий балл перспективности (табл. 4).

На наш взгляд они являются наиболее приспособленными и адаптированными по генетическим, физиологическим и экологическим особенностям проявляемых в засушливых условиях.

Многочисленными опытами доказано, что своевременное обеспечение высокомикотрофных пород микоризами эктотрофного типа – важное условие хорошей приживаемости, дальнейшего роста сеянцев и саженцев, устойчивости растений в неблагоприятных условиях.

Проведенные исследования позволили создать базу данных по микотрофности интродуцированных видов дендрофлоры.

Таблица 4. Балльная оценка показателей жизнеспособности и перспективности интродуцированных растений (в среднем за 2010-2017 гг.).

Виды древесных растений	Жизненная форма	Возраст растений, лет	Балл зимостойкости	Показатели жизнеспособности							Общая оценка	
				Одревеснение побегов	Зимостойкость	Сохранение формы роста	Побегообразование	Прирост в высоту	Генеративное развитие	Возможные способы размножения в культуре	Сумма показателей жизнеспособности	Группа перспективности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Семейство Хвойные (*Pinaceae*) Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*)	Д	18	I	20	25	10	5	5	25	ИП (7)	97	I*
Семейство Ильмовые, или Вязовые (Ulmaceae) Вяз гладкий, или обыкновенный (*Ulmus laevis Pall.*)	Д	18	II	20	20	10	5	2	25	ИП (7)	89	II
Семейство Каркасовые (*Celtidaceae*) Каркас кавказский (*Celtis caucasica Willd.*)	Д	18	III	20	15	10	5	5	25	ИП (7)	87	II
Семейство Бобовые, или Мотыльковые (*Fabaceae*) Робиния лжеакация, или белая акация (*Robinia pseudacacia L.*)	Д	20	III	20	15	5	5	5	25	ИП (7)	87	II
Семейство Конскокаштановые (*Hippocastanacea*е) Конский (горький) каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum L.*)	Д	19	II	20	20	10	5	5	25	ИВР (3)	89	II
Подкласс Астериды (*Asteridae*) Семейство Маслиновые (*Oleaceae*) Ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior L.*)	Д	18	II	20	20	10	5	5	25	ИВР (3)	88	II
Семейство Калиновые (*Viburnaceae*) Калина обыкновенная, или красная (*Viburnum opulus L.*)	К	9	II	20	20	10	5	5	25	ИП (7)	92	I

Примечания к таблице 4: * − баллы перспективности для защитного лесоразведения: I – вполне перспективные, II – перспективные, III – менее перспективные; ИП (7) – искусственный посев, ИВР (3) – искусственное вегетативное размножение; ПС (1) – привлечение семян или растений из других районов

Из интродуцированных видов дендрофлоры, в сухостепные условия 9 (19.5%) оказались без микоризы (индекс 1), у 24 (52.1%) видов – слабая (индекс 2), 11 (23.9%) – средняя (индекс 3) и 4 (8.6%) – сильная степень развития микоризы (индекс 4).

Виды дендрофлоры с сильной степенью микотрофности платан восточный (*Platanus orientalis* L.), бук восточный (*Fagus orientalis* Lipsky., *Quercus robur* L.) эндо- или эктомикоризы характеризует необходимость их использования в условиях богатых гумусом почвах. Такие виды не имеют шансов или утратили свою устойчивость в бедных почвах.

Виды дендрофлоры с индексом 1 представляют наибольший интерес для первоначального их внедрения во вновь создаваемые барьерные зоны защитных лесных насаждений, поскольку у этих видов корни проникают глубоко в почву для всасывания воды и растворенных в ней элементов минерального питания: эфедра двуколосковая (*Ephedra distachya* L.), шелковица белая (*Morus alba* L.), шелковица черная (*M. nigra* L.), бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare* L.), лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia L.*), гледичия обыкновенная (*Gleditsia triacanthos L.*), робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.), карагана древовидная (*Caragana arborescerns* Lam.), абрикос обыкновенный (*Armeniaca vulgaris* Lam.), смородина золотистая (*Ribes aureum* Pursh.) и др.

Особенности микоризации корневых систем однолетних сеянцев приведены в таблице 3 на примере дуба черешчатого (*Quercus robur* L.; Лобанов, 1971).

По результатам исследования разработан инновационный способ восстановления лесополос после пожаров, защищенный Патентом РФ (Адамов и др., 2013).

Предлагаемый способ позволяет обеспечить 100% прорастание семян, формирование плодов и приживаемость сеянцев на территории после пирогенных воздействий.

Экспериментально доказано, что возврат микоризообразующего грибного компонента почвы, т.е. создание условий для образования новой микоризы выступает главным условием воспроизводства леса на гарях.

Характерная особенность разработанной технологии состоит в том, что гари не расчищаются, сгоревшие деревья и кустарники не удаляются, как пища (легкодоступный углерод) для первых живых организмов гарей – пирогенных грибов, способствующих восстановлению биоразнообразия и целостности прежней компонентной среды леса.

Выводы

Интродукция имеет первостепенное значение в сухостепных, полупустынных и пустынных условиях. Большинство из них – местные виды, автохтоны, или достаточно адаптировавшиеся интродуценты из других, более жарких регионов.

Выявлены общие закономерности формирования биоразнообразия в различных природных фациях, позволяющие обеспечить возможность интродукции многих устойчивых его видов в сухостепные условия юга России для создания защитных лесных насаждений.

Разработаны основные направления и практические рекомендации по интродукции 21 вида древесно-кустарниковых растений в аридных условиях для расширения ассортимента деревьев и кустарников для защитного лесоразведения, разработана информационная база данных их экологической эффективности для создания барьерных защитных лесных насаждений.

Определена группировка нагорных ксерофитов для интродукции в сухостепных аридных регионах для использования в защитном лесоразведении: барбарис обыкновенный (*Berberis vulgaris* L.), каркас кавказский (*Celtis caucasica* Willd.), лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia* L.), держидерево (*Paliurus spina-christi* Mill.), слива колючая (*Prunus spinosa* L.), груша иволистная (*Pyrus salicifolia* Pall.), роза собачья (*Rosa canina* L.) и др.

Созданная информационная база данных по степени микотрофности позволяет формировать состав и структуру защитных лесных насаждений, а также последующее их обогащение микотрофными видами. Из изученных видов 9 оказались без микоризы. Гледичия трёхколючковая (*Gleditsia triacanthos* L.), бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosus* Scop.) – имеют индекс микотрофности 1; у 24 видов – слабая микотрофность (каркас кавказский (*Celtis caucasica* Willd.), роза собачья (*Rosa canina* L.) и др.) – индекс микотрофности 2; у 11 видов – средняя микотрофность (клен полевой (*Acer campestre* L.), боярышник обыкновенный (*Crataegus laevigata* (Poir) Dc.) и др.) – индекс микотрофности 3; а у 4 видов – сильная микотрофность (бук восточный (*Fagus orientalis* Lipsky.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) и др.) – индекс микотрофности 4.

Комбинационное распределение видов дендрофлоры по степени микотрофности и типу корневой системы указывает на тесную связь между этими показателями (критерии Пирсона – 0.78).

По результатам исследований разработан инновационный способ восстановления лесных насаждений после пожаров, защищенный Патентом РФ №2492627, который позволяет обеспечить 100% прорастание семян, плодов и приживаемость сеянцев на территории после пирогенных воздействий, а также воспроизвести лес и полную лесную экологическую среду с улучшенными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гасанов Ш.Ш. 2006. Структурная экология // Методология и методы. Махачкала: ИД Наука плюс. 200 с.

Громыко Г.Л. 2013. Теория статистики. Практикум. 5-е изд., исп. и доп. М.: ИНФРА–М. 238 с.

Зайцев Г.Н. 1981. Фенология древесных растений. М.: Наука. 120 с.

Лавренко Е.М. 1959. Основные закономерности растительных сообществ и пути их изучения // Полевая геоботаника. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР. С. 12-75.

Лапин П.И., Сиднева С.В. 1973. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М.: Изд-во ГБС. С. 7-67.

Лапин П.И., Калуцкий К.К., Калуцкая О.Н. 1979. Интродукция лесных пород. М.: Лесная промышленность. 224 с.

Лобанов Н.В. 1971. Микротрофность древесных растений. М.: Лесная промышленность. 216 с.

Погиба С.П., Курносов Г.А., Казанцева Е.В. 2003. Методы количественной генетики в лесной селекции // Методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 260400 и 260500. 3-е изд. М.: МГУЛ. 36 с.

Семенютина А.В. 2005. Лесомелиорация и обогащение дендрофлоры аридных регионов России. Дис. ... док. сельхоз. наук. Волгоград: Всероссийский научно-исследовательский институт агролесомелиорации. 440 с.

Серебряков И.Г. 1962. Экологическая морфология растений. М.: Высшая школа. 377 с.

Смирнова О.В. 2008. Сукцессия и климакс как экосистемный процесс // Успехи современной биологии. Т. 128. № 2. С. 129-144.

Адамов М.Г., Адамова Р.М., Яровенко А.Ю. 2013. Способ восстановления лесополосы после пожаров. Патент на изобретение № 2492627. Авторы патента: 20.09.2013.

Сукачев В.Н. 1942. Идея развития фитоценологии // Советская ботаника. № 1-3. С. 5-17.

Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья – 95. 990 с.

Шемаханова Н.М. 1962. Микотрофия древесных пород. М.: Изд-во АН СССР. 374 с.

Шубин В.И. 1973. Микотрофность древесных пород и ее значение при разведении леса в таежной зоне. Л.: Наука. 262 с.

West D.C., West H.H., Shugart D.F., Botkin D.F. 1981. Plant Succession and Soil Development in Coastal Sand Dunes of Subtropical Eastern Australia // Forest Succession. Concepts and Application. Ch. 8. Spinger-Verlag. New-York. Heidelberg. Berlin. P. 107-131.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 33-40

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК625.77

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭТИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ГОРОДСКИМ ПАРКАМ В ГУДЖРАТЕ, ПАКИСТАН

© 2021. М.М. Анвар, Ф. Файяз, А. Азиз, М.Р. Махмуд

Университет Гуджрата
Пакистан, 50700, Гуджрат, Пенджаб, Джалалпур Джаттан Роад
E-mail: mushahid.anwar@uog.edu.pk, 17021708-015@uog.edu.pk,
asadazizpakistan@gmail.com, dr.riazmahmood@uog.edu.pk

Поступила в редакцию 03.06.2020. После доработки 03.07.2020. Принята к публикации 01.12.2020

Анализируется большая проблема города Гуджрат в Пакистане, где зеленые насаждения подвергаются замене инфраструктурой, а оставшиеся зеленые зоны и парки сталкиваются с различными проблемами, включая строительство и отсутствие планирования и бюджета. Текущее планирование землепользования подорвало городскую экономику в долгосрочной перспективе, поэтому существует острая необходимость анализа данной ситуации для достижения целей устойчивого развития. Определено, что курортные места и парки расположены вокруг города. Это затрудняет к ним доступ среднего класса. Результаты нашего исследования показывают, что парки улучшают социальные отношения между жителями района, а значит, соответствующие органы власти должны управлять распределением бюджета для зеленых насаждений и парков, чтобы улучшить общую картину городской планировки. Исследование также показало, что появление новых зеленых насаждений важно для улучшения роста экономики, сельского хозяйства и вовлеченности людей в решение экологических проблем. Учитывая интересы региона, правительству следует поддержать идею о сохранении зеленых зон в городе для улучшения экологии.

Ключевые слова: экологическое развитие, зеленые зоны и парки, развитие инфраструктуры, планирование землепользования, цели устойчивого развития.

DOI:

Как следует из работы J. Pigram (1983), отдых считается добровольно осуществляемой деятельностью, предназначенной в первую очередь для удовольствия и удовлетворения человека, особенно в свободное время (Veal, 1992). Комиссия президента США по открытому воздуху (President's Commission on American Outdoors), собранная в 1985 году, опубликовала в 1987 году отчет, где объяснила важность пребывания на открытом воздухе. Отдых и досуг оказывают профилактический, лечебный и терапевтический эффекты на здоровье. Термин «отдых» можно считать активностью, полезной для здоровья, которая помогает расслабиться и восстановиться после тяжелой работы, вернуть энтузиазм, тонус уму и телу (Breitenstein, Ewert, 1990). Удовлетворение экологических и экономических потребностей, потребностей человека, а также счастье − это некоторые из выгод, которые можно получить от экосистемных услуг. Выгоды от таких услуг предполагают экономическую ценность, но это означает не только их денежную стоимость, хотя природоохранная, социально-культурная ценность и ценность для здоровья также демонстрируют некоторые преимущества экосистемных услуг. Ценности природы, которые выражаются не в денежном плане, демонстрируют не только инструментальную ценность природного капитала, но также эвдемонистические и фундаментальные ценности. Социально-экономическая и экологическая система связана с органами власти и является неотъемлемой частью общей структуры. Политика государственных ведомств по управлению природными ресурсами направлена на достижение желаемых результатов за счет движущей силы изменений (Maes et al., 2016).

Инициатива «Экономика экосистем и биоразнообразия» уделила основное внимание оценке экосистемных услуг как инструмента для планирования городского землепользования и сделала упор на разграничении пространственных экосистемных услуг, оценочных данных для планирования, управленческих целей и вынесения решений. Существует более широкий рынок и возможности для

построения карьеры в сфере экосистемных услуг и связанных с ними исследований, которые в основном проливают свет на производство экосистемных услуг, не давая при этом предварительного комплексного исследования (Tammi et al., 2016). Международная федерация по управлению парками и отдыхом (International Federation of Parks and Recreation Administration) сделала некоторые полезные выводы о городских парках, в том числе об их прямом и косвенном влиянии на здоровье человека во время досуга. Туризм вносит вклад в региональную экономику. Качество воздуха влияет на обеспечение кислородом и поглощение углерода, а его охлаждающий и успокаивающий эффект делает атмосферу пригодной для жизни (Konijnendijk et al., 2013). Общие наблюдения, экологические исследования и эксперименты показывают, что экосистемы и биоразнообразие сильно взаимосвязаны по функциональным возможностям организмов в экосистеме и количественному распределению этих организмов во времени и пространстве (Hooper et al., 2005).

Различные коммуникации, вмешательства и стратегии можно применять в разных областях общей системы для улучшения благосостояния людей и защиты экосистемы. За последние десятилетия это положение стремительно изменилось с логистической точки зрения. Изменения в нынешней эпохе невозможно сравнить ни с одной другой эпохой или периодом человеческой истории. Их причиной является, в первую очередь, растущий спрос на древесину, топливо, продукты питания, воду и волокно. А последствиями становятся необратимые изменения жизни на Земле. Развиваясь, человечество неосознанно пришло к тому, что экосистемных услуг перестало хватать. Такие изменения могут усугубить бедность в некоторых странах мира (Reid et al., 2005). Устойчивость необходимо укреплять поддержкой биоразнообразия и функционирования экосистем, одновременно улучшая благосостояние человечества. Необходимо преодолеть пропасть между экологическими достижениями и социальными взаимодействиями, а экосистемные услуги как раз сосредоточены на поддержании компромиссов между двумя сторонами (Crouzat et al., 2016).

В своем исследовании мы оценивали значимость и готовность посетителей парковых зон платить в зависимости от их социального и экономического статуса. Мы наблюдали за двумя основными парками и проводили анкетирование местных жителей. Среди них почти 60% были готовы платить, что свидетельствует о том, что они согласны с тем, что зеленые насаждения крайне важны (Mokhtari, Hosseinifar, 2013). Таким образом, можно сделать вывод, что существует острая необходимость в изучении и анализе данных проблем и услуг. В этой статье мы углубляемся в тему, а также приводим результаты экспериментального анализа, который станет руководством для разработки политики и управления городскими территориями.

В нынешнюю эпоху развития вложения в парки стали крупнее по сравнению с сокращением расходов на федеральном уровне. Помимо прочего парки и зеленые насаждения привлекли внимание рынка. Поэтому большая часть их финансирования идет из налогов, а значит, они вынуждены работать на получение собственного дохода в виде сборов с посетителей, которые таким образом превращаются в клиентов (Godbey et al., 2005). Обеспечение качественной и благоприятной среды в настоящее время является удобством на социально-экономическом, общинном, рациональном и этническом уровнях классового неравенства. Более того, исследования показали, что в США существует маргинальная разница в обслуживании населения в контексте представителей темнокожих и латинских рас: их обслуживают и лечат соответственно их низкому доходу в странах севера (Rigolon et al., 2018).

Такие яркие маргинальные различия наблюдаются в последние несколько десятилетий, и со временем городские колонии разрастаются быстрее городского населения. Между тем, многие зеленые зоны поглощаются городом. Небольшие зеленые участки придают эстетичный вид местности вдоль дорог. Исследования показали, что такие виды парков в микрорайонах должны быть доступны местным жителям, чтобы те могли отдохнуть и провести время в обществе как единое целое. Крупные и слаборазвитые города Пакистана не соответствуют стандартам жизни в сообществе. Парки на глазах приходят в упадок, вместо того чтобы развиваться до состояния, при котором ими смогло бы пользоваться население (Khan, Shafqat, 2014).

Существующим паркам не уделяют должного внимания, что приводит к ухудшению ситуации (Alam et al., 2014). Лишь небольшое количество жителей знакомо с идеей экосистемных услуг и знает об их значении для человеческого благополучия (Anwar, 2012). А правительство, как правило, считает, что городские территории служат для обеспечения населения продуктами питания и удовлетворением

основных потребностей, а зеленые насаждения, напротив, в основном игнорируются. Такое отношение нанесло долгосрочный ущерб городской инфраструктуре. Существует проблема избирательного и равного доступа к экологическим услугам (Erkip, 1997). Зеленые насаждения имеют символическое значение в развитии городской экологии, экономики и социальных ограничений. Озеленение имеет высокий потенциал для городов, поскольку приносит экологические, а также общественные выгоды (Pincetl, Gearin, 2005).

Физическая активность поддерживает здоровье. Пешеходные дорожки, парки и зеленые насаждения на городских территориях − это места, которые поощряют физическую активность, особенно в сообществах с низкими доходами, где жители часто испытывают недостаток ресурсов и удобств. Парки с зелеными насаждениями и дорожками для прогулок и занятий спортом (например, теннисные корты) подходят для упражнений подростков и взрослых, а парки с небольшими игровыми площадками − для детей. Некоторые исследования, основанные на подсчете парков, не учитывают таких различий. Считая эти типы парков одинаково полезными для взрослых, можно не заметить связи между близостью парка к дому и физической активностью человека (Ou et al., 2016). Существует огромное количество организаций и сообществ, которые пошли бы на увеличение количества общественных парков, чтобы улучшить свою социальную активность в обществе. Тем не менее, подобная деятельность редко получает признание. У общественных организаций зачастую очень небольшой бюджет на парковую деятельность, поэтому, как правило, они более рентабельны, чтобы оптимизировать свои вложения. Новые постройки и маркетинговые кампании, вероятно, выступают важными факторами, поскольку привлекают больше людей в парки и места отдыха.

Необходимы дальнейшие исследования, чтобы понять, как сделать такую инициативу более масштабной и извлечь пользу не только для участников программы, но и для обычных посетителей парка и членов сообщества. Специализированные занятия также могут послужить визуальным напоминанием или поощрить людей проявлять физическую активность, даже если в занятиях они не участвуют (Han et al., 2015). На основе таких наблюдений мы предполагаем, что парки, в отличие от крытых парков аттракционов или развлечений дома, играют важную роль в вовлечении людей в физические нагрузки. Тот факт, что молодежь участвует в неструктурированной деятельности, задает направление к более насыщенной физической активности в загородной местности или даже в самих городских сообществах. Парки должны находиться в пешей доступности для молодежи, чтобы та могла чаще ими пользоваться, оставаться физически активной и поддерживать свой психологический тонус (Moore et al., 2017).

Методы исследования

Территория исследования. Исследование основано на качественной оценке, включая сбор данных, с помощью которого мы проанализировали анкеты, собранные среди жителей различных районов города Гуджрат. Гуджрат расположен на правом берегу реки Чинаб, между 32.5731° с.ш. и 74.1005° в.д., его площадь составляет 3.177 км^2 (рис. 1). В городе существуют три общественных парка: Наваз Шариф, Женский и Детский и парк Инайят.

Цели исследования. В данной работе мы ставим следующие цели: 1) изучить необходимость в городских парках в г. Гуджрат и их качество, 2) изучить требования к городским паркам Гуджрата, 3) оценить удаленность парков от центра города.

Методы. Анкета была составлена из 26 вопросов, заданных жителями исследуемой территории. Она была разделена на три основных раздела: социально-экономический статус респондента, его мнение о проблеме зеленых насаждений, его оценка территории. Графическая интерпретация ответов сформулировала более четкую картину исследования и подтолкнула анализ в заданном направлении. Мы отобрали 9 колоний с жителями среднего и высшего среднего классов, чтобы собрать первичные данные: Шадман, Аль Наби, г. Шалимар, Заиб, Маргзар, Багдад, г. Фаисал, Гульшан и Модельный город в районе исследования. Колонии Шадман и Маргзар относятся к высшему среднему классу, однако люди в них в основном придерживались мнения о том, что правительство не создало ни одного парка для взрослых и ни одного парка с развлечениями для детей, чтобы те могли играть в коммунальных границах колонии.

Между тем, жители Модельного города рассказали, что собственноручно профинансировали и построили маленькую детскую площадку и что государственная поддержка им оказана не была. В то же время другие колонии, такие как Заиб и Шалимар, заявили, что для занятий спортом их дети в

основном используют открытые уличные пространства. При этом многие родители не доверяют небезопасной окружающей обстановке, поэтому предпочитают, чтобы их дети играли в помещении, тем самым лишая их какого-либо социального общения.

Ввод данных был осуществлен после получения первичных данных для последующего статистического анализа в программном обеспечении Statistical Package for Social Sciences (SPSS) с дальнейшим получением описательной статистики. Эти описательные данные приведены в таблицах и графиках, созданных в Office Excel. Первичные данные помогли достичь цели исследования и спроектировать модель описательного анализа исследования.

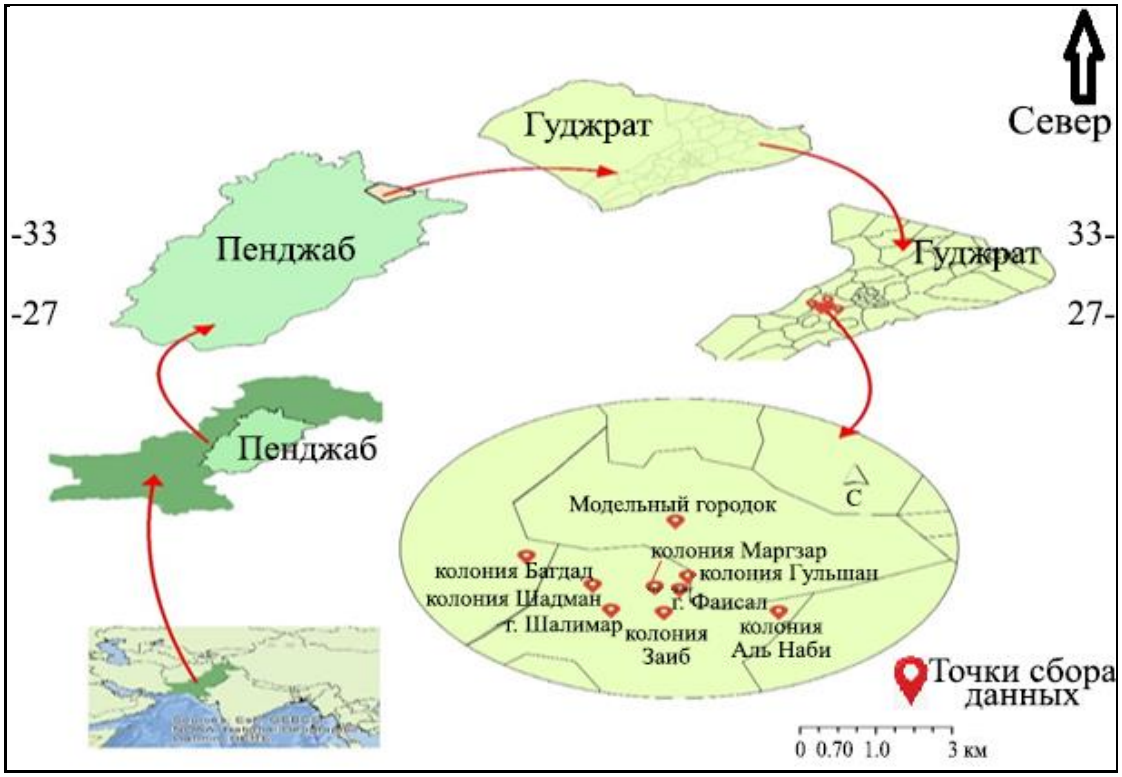

Рис. 1. Территория исследования в г. Гуджрат, Пакистан.

Когда мы получили четкую картину того, как люди понимают существующую проблему, данные были выражены в графиках и таблицах. Они необходимы для того, чтобы получить вторичные данные и провести сравнительный анализ, а впоследствии описать остроту проблемы более детально. Чтобы получить вторичные данные, мы связались с Муниципальной администрацией техсила[1] Гуджрат. Она предоставила информацию, которая помогла сделать исследование более наглядным. Большая часть вторичных данных, собранных Администрацией, была в таблицах: затраты на новые и предлагаемые парковые зоны и прогнозы о количестве человеческих ресурсов, необходимых для ускорения выполнения планов. Вторичные данные помогли нам достичь третьей цели исследования − сравнительного анализа − и выяснить, как именно изменились зеленые насаждения за определенный период времени. Администрация предоставила только те данные о парках, которые были выданы официальными правительственными органами, в то время как данными о небольших зеленых зонах оно не располагало.

Сравнительный анализ данных. После того как данные из первичного и вторичного источников были проанализированы в Excel и SPSS, возникла необходимость выполнить сравнительный анализ. Для более четкой визуализации сравнительный отчет по картам мы выполнили с использованием программного обеспечения ArcMap. Инструмент анализа ArcMap разбил парки исследуемой территории на категории, включая развивающиеся, слаборазвитые и недоразвитые зеленые

[1] Техсил – месная единица административнрого деления города (прим. ред.).

насаждения. После получения результатов анализа мы обсудили их и сделали заключение, чтобы подвести итоги всей работе. Рекомендации, предложенные в исследовании, основаны на точке зрения, которая стоится на личном уровне понимания изложенной проблемы.

Результаты и обсуждение

Результаты показали, что недостаток объектов для отдыха и проведения экскурсий подчеркнул всю серьезность этой проблемы. Люди охотно делились мнениями и информацией о текущем состоянии зеленых насаждений г. Гуджрата, в большинстве районов которого отсутствуют даже скверы. Наша анкета состояла из 26 вопросов и была разделена на 3 части: социально-экономический статус респондента, его оценка территории, а главное, его понимание заявленной проблемы. Мы также добавили открытые вопросы, чтобы выяснить общественное мнение о том, насколько сложна текущая ситуация. Первичные данные были собраны от 350 человек, проживающих на исследуемой территории. Информацию собирали в том числе у родителей, которые поделились своим опытом в поиске подходящего места для активного отдыха детей. Представители практически всех слоев общества, от студентов колледжа до случайных прохожих и от студентов университета до подростков, высказали свою точку зрения по данному вопросу.

Требования к бюджету были изучены в этом исследовании очень подробно. Здесь представлены данные, полученные из наших расчетов. Предварительные затраты составляют 86.529 млн. рупий, из которых 64.581 млн. требуются на год, а 21.948 млн. − на один раз, что превышает финансовые возможности Муниципальной администрации Гуджрата. Поэтому мы предлагаем направить правительству Пенджаба предложение о финансовой поддержке рабочих мест на контрактной основе, а также сделать периодическим выделение бюджета на приобретение транспортных средств и техники, сосредоточив внимание на развитии транспортной инфраструктуры, которая требуется для существующих парков и дорог. На технику требуется 20.748 млн. рупий, а на транспорт − 1.220 млн., из чего и складывается в конечном счете общая сумма. Всего на наполнение парков и экскурсионных мест необходимо 86.529 млн. рупий.

В таблице 1 и на рисунке 2 объясняется необходимость в бюджетных затратах на год.

Таблица 1. Общие ежегодные бюджетные расходы.

№	Ежегодные бюджетные затраты	Сумма, рупии
1	Необходимые человеческие ресурсы	49.081 млн.
2	Семена и растения	5.000 млн.
3	Стойки для растений и горшки	1.500 млн.
4	Образовательные кампании	0.500 млн.
5	Топливо	4.500 млн.
6	Счета за электричество	2.000 млн.
7	Непредвиденные расходы	2.000 млн.
	Всего	64.581 млн.

Требования к человеческим ресурсам. В исследовании также приводится сравнительный анализ разрушения предложенных и уже существующих парков города. Муниципальная администрация техсила Гуджрат уже провела краткий фактический анализ данного вопроса. У Администрации наблюдается огромный финансовый дефицит, а потому − невозможность выполнить большинство свежих проектов. Предложение «Садоводство для города Гуджрат» отклонили только из-за не приоритетности строительства общественных парков, а также отсутствия необходимых для проекта человеческих ресурсов. Помимо самих людей необходимо также оборудование, инструменты, растения и многое другое. Общая сумма бюджетных потребностей для оборудования составляет почти 34.248 млн. рупий, включая 3% от средств на непредвиденные расходы. В сумму входят затраты на ручные и механические газонокосилки, разнообразные тракторы, опрыскиватели, тележки, семена, растения, песок, горшки и образовательные кампании, счета за электроэнергию, генератор, топливо и другое. В то время как общая сумма, заложенная на человеческие ресурсы,

составляет 23.223 млн. рупий, фактическая сумма составляет почти 57.471 млн., с учетом денег на транспортировку, которая подразумевает наличие транспортных средств, чтобы персонал и работники могли быстро перемещаться по территории.

Удаленность парков от колоний. Мы провели сравнительное описание результатов анализа собранных данных. График на рисунке 3 показывает, что парки, включая даже небольшие зеленые участки земли, сильно удалены от колоний. Места для отдыха, такие как парк развлечений Кинара и парк Шахбаз Шариф, расположены в среднем в 11 км от колоний, находящихся в центре города. Семьи из среднего класса не могут преодолевать большое расстояние ежедневно и даже еженедельно. Поэтому не только восстановление парков должно быть приоритетом для правительства, но и их доступность для жителей.

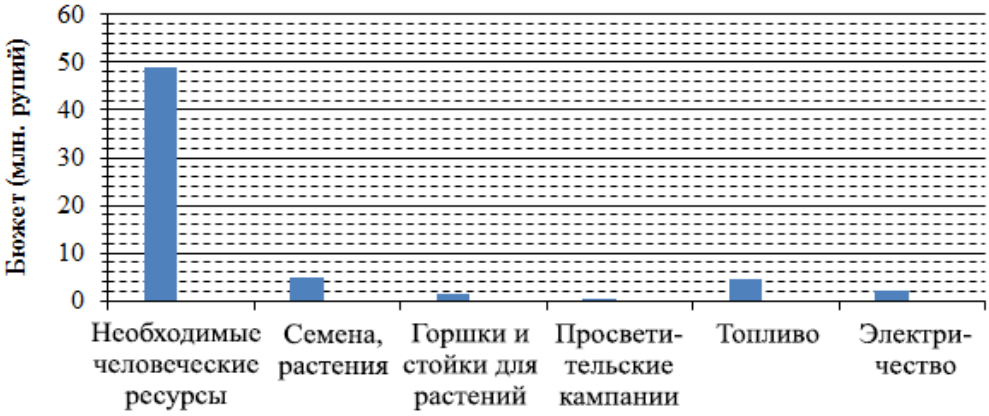

Рис. 2. График годового бюджета.

Для сбора первичных данных − общественного мнения о ближайшей парковой зоне − мы выбрали 9 различных колоний. Результаты значительно коррелируют со вторичными данными. Парки или места для экскурсий, построенные правительством, такие как Наваза Шарифа, Женский и Детский парки, сейчас пребывают не в лучшем состоянии для их ежедневного посещения и проведения досуга. Люди сочли более безопасными и доступными те места, которые не были заявлены правительством как зеленые зоны, но которые общество предпочитает для своих встреч, игр и досуга. Эти районные парки принадлежат частным объединениям горожан. Колледж Заминдар, зеленые насаждения Модельного города, сад у реки, зеленая зона или даже территория стадиона Захура Иллахи привлекают больше общественного внимания, чем официальные правительственные парки; они расположены в центре города в 1.5-2.5 км от жилых колоний.

На рисунке 3 показан график, в соответствии с которым парки, заявленные Муниципальной администрацией техсила Гурджат как часть государственной собственности, оказались расположены далеко от центра города, что делает их труднодоступными для жителей среднего класса.

Статус развития парков. Гуджрат занимает примерно 788760.4 акров, тогда как общая протяженность зеленой зоны в жилых районах достигает около 35.28 акров, с учетом и государственных, и районных парков. Государственные парки занимают всего 11.91 акров, что должно побудить правительство серьезно отнестись к данному вопросу и не только продолжить поддержание существующих парков, но и создать новые, чтобы обеспечить повышение уровня жизни городского населения.

Как следует из стандартов, установленных Американским обществом лиц, ответственных за планирование (American Society of Planning Officials), на территорию для парков и отдыха на природе должно отводиться 12.5% от общей площади города, а значит, в одном только Гуджрате почти 98595.05 акров должны быть заняты парковыми зонами. Но площадь зеленых насаждений составляет всего 0.0045% от общей площади города, что, несомненно, является тревожной ситуацией для общественного здоровья.

Выводы

Отсутствие эффективных зеленых зон в различных своих вариациях практически немыслимо в

современной концепции города. Урбанизация и распространение людей привели к неизбежному появлению зеленых насаждений. В нынешней экологической и фактической концепциях городских территорий зелень, без всякого преувеличения, играет роль их легких. Создание таких насаждений для человеческого взаимодействия и общения является одним из способов поддержания общественного баланса. Результаты оценки изученной территории парков и зеленых зон в городе Гуджрате позволили нам вывести следующие рекомендации.

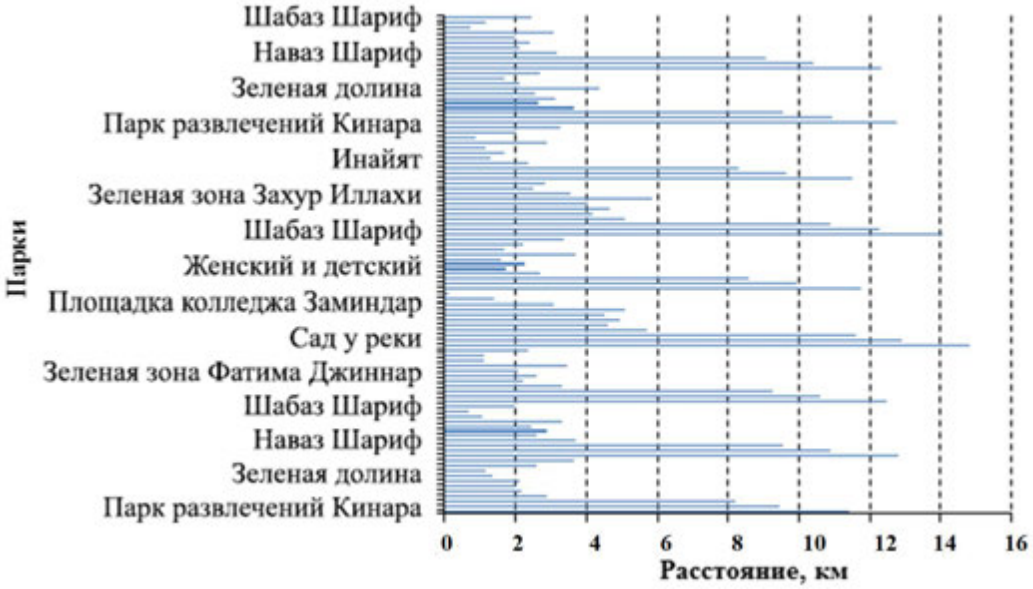

Рис. 3. Расстояние от Гуджата до различных парков.

Таблица 2. Статус развития зеленых зон на исследуемой территории.

№	Название парка	Статус	Статус развития	Площадь, акры
1	Инайят	государственная собственность	недоразвитый	0.65
2	Женский и детский	государственная собственность	слаборазвитые зеленые насаждения	2.75
3	Наваз Шариф	государственная собственность	развивающийся, мало насаждений	8.51
4	Зеленая зона Модельного города	нет	слаборазвитые зеленые насаждения	3.88
5	Парк развлечений Кинара	нет	недоразвитый	2.55
6	Сад у реки	нет	недоразвитый	0.74
7	Площадка колледжа Заминдар	нет	развивающийся, мало насаждений	7.74
8	Зеленая зона Фатима Джинна	нет	слаборазвитые зеленые насаждения	2.35
9	Зеленая зона Захур Иллахи	нет	слаборазвитые зеленые насаждения	4.73
10	Зеленая долина	нет	недоразвитый	1.38

Правительству следует провести тендер для привлечения к работе на данной территории новых людей, а также поддержать ее развитие финансово, чтобы подобные проекты, также отсроченные, утверждались должностными лицами Гуджрата. Главной причиной большинства таких проблем выступает недостаток человеческих ресурсов в городе. А основная причина уменьшения количества зеленых зон на его территории − незапланированное строительство и исключительная небрежность

при замене насаждений инфраструктурой. Правительство должно в приоритетном порядке заниматься проблемой сокращения зеленых территорий. Недостатки финансирования и бюджета должны быть урегулированы как можно скорее. Такие пограничные проблемы нельзя решать проволочками по предложенным проектам. Правительству необходимо вкладываться в уже существующие проекты, а также выделять земельные участки под новые парки.

Необходимо принять общий стандарт, используя в качестве модели любой из стабильно развивающихся зеленых городов в мире, чтобы организация парков проходила плавно и без экспериментальных инициатив. Правительство должно устраивать семинары и проводить просветительские кампании, чтобы на индивидуальном уровне побуждать людей присоединяться к решению проблемы озеленения города. В приоритете должны быть не только крупные общественные парки, но также и небольшие зеленые участки, такие как скверы, парки микрорайонов и места для экскурсий. После чего следующим в очереди на финансирование развития городской инфраструктуры Муниципальное администрация техсила Гудржат должна представить процесс инвентаризации парка в соответствии с международными стандартами, которые установлены во многих развитых странах мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Alam R., Shirazi S.A., Bhalli M.N., Zia S.M., Minallah M.N.U. 2014. Spatial Distribution of Urban Green Spaces in Lahore, Pakistan: A Case Study of Gulberg Town // Pakistan Journal of Science. No. 66 (3). Pp. 277-281.

Anwar M.M. 2012. Recreational Opportunities and Services from Ecosystem Services Generated by Public Parks in Megacity Karachi-Pakistan // Sindh University Research Journal – SURJ (Science Series). No. 44 (1). Pp. 23-28.

Breitenstein D., Ewert A. 1990. Health Benefits of Outdoor Recreation: Implications for Health Education // Journal of Health Education. No. 21 (1). Pp. 16-21.

Crouzat E., Martín-López B., Turkelboom F.S. 2016. Disentangling trade-offs and synergies around ecosystem services with the influence network framework: illustration from a consultative process over the French Alps // Ecology and Society. No. 21 (2). P. 32.

Erkip F.B. 1997. The Distribution of Urban Public Services: The Case of Parks and Recreational Services in Ankara // Elsevier, Cities. No. 14 (6). Pp. 353-361.

Godbey G.C., Caldwell L.L., Floyd M., Payne L.L. 2005. Contributions of Leisure Studies and Recreation and Park Management Research to the Active Living Agenda // American Journal of Preventive Medicine. No. 28 (2). Pp. 150-158.

Han B., Cohen A.D., Derose K.P., Marsh T., Williamson S., Loy S. 2015. Effectiveness of a Free Exercise Program in a Neighborhood Park // Elsevier. No. 2. Pp. 255-258.

Hooper D.U., Chaplin III F.S., Ewel J.J., Hector A., Inchausti P., Lavorel S., War D.A. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge // Ecological Mnographs. No. 75 (1). Pp. 3-35.

Khan A.A., Shafqat A. 2014. Assessing the Spatial Distribution and Allocation Gaps of Urban Parks in Bahawalpur City of Punjab, Pakistan // Pakistan Journal of Social Sciences. No. 34 (2). Pp. 545-561.

Konijnendijk C., Annerstedt M., Nielsen A.B., Maruthaveeran S. 2013. Benefit Of Urban Parks. Copenhagen & Alnarp: IFPRA. 70 p.

Maes J., Liquete C., Teller A., Erhard M., Paracchini M.L., Barredo J.I., Lavalle C. 2016. An Indicator Framework For Assessing Ecosystem Services in Support of EU Biodiversity Strategy to 2020 // Elsevier. No. 17. Pp. 14-23.

Mokhtari R., Hosseinifar S.M. 2013. Economic and social value of recreational facilities in urban areas by using Travel Cost Method (Case study: Amirkola Urban Park, Mazandaran Province, Iran) // European Online Journal of Natural and Social Sciences. No. 2 (4). Pp. 549-555.

Moore J.B., Cook A., Schuller K., Lu Y., Yuan Z., Maddock J.E. 2017. Physical Activity and Park Use of Youth in Nanchang, China // Elsevier. No. 8. Pp. 256-260.

Ou J.Y., Levy J.I., Peters J.L., Bongiovanni R., Soto J.G., Medina R., Scammell M.K. 2016. A Walk in the Park: The Influence of Urban Parks and Community Violence on Physical Activity in Chelsea, MA // International Journal of Environmental Research and Public Health. No. 13 (1). P. 97.

Pincetl S., Gearin E. 2005. The Reinvention of Public Green Space // Journal of Urban Geography. No. 26 (5). Pp. 365-384.

Reid W.V., Mooney H.A., Cropper A., Capistrano D., Carpenter S.R., Chopra K., Zurek M.B. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC: World Resources Institute. P. 137.

Rigolon A., Browning M.H.E.M., Lee K., Shin S. 2018. Access to Urban Green Space in Cities of the Global South: A Systematic Literature Review // Urban Science. No. 2 (3). Pp. 25-67.

Tammi I., Mustajärvi K., Rasinmäki J. 2016. Integrating Spatial Valuation of Ecosystem Services into Regional Planning and Development // Elsevier. No. 26 (2). Pp. 329-344.

Veal A.J. 1992. Definitions of Leisure and Recreation // Australian Journal of Leisure and Recreation. No. 2 (4). Pp. 44-48.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 41-48

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 911.375.62 (460.356)

ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗЕЛЕНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА МАЛАГА

© 2021 г. Е.Е. Миронова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы
E-mail: eev.mironova@yandex.ru, liza.mironova@icloud.com

Поступила в редакцию 16.09.2020. После доработки 01.10.2020. Принята к публикации 01.12.2020

В статье рассматриваются методические подходы к оценке пространственной конфигурации и структуры зеленых насаждений и фрагментов природного ландшафта (на примере города Малага, Испания). Применяются современные методы ГИС-моделирования для оценки зеленой инфраструктуры Малаги с точки зрения конфигурации, фрагментированности и пространственной структуры зеленых насаждений (при помощи программного обеспечения GuidosToolBox). Используемый метод морфологического пространственного анализа (MSPA-анализ) ориентируется на геометрию и связность компонентов на основе растрового изображения изучаемой территории, может автоматически идентифицировать экологические коридоры разного размера, а также в дальнейшем ранжировать их в пределах сети, тем самым позволяя оценить связность зеленого каркаса города.

Результатом MSPA-анализа является получение представления о конфигурации и структуре зеленых насаждений и выделение основных базовых резерватов (ядра) и островов зеленой инфраструктуры, экологических коридоров; проведена оценка связности и фрагментированности – критически значимых для определения единства экологического каркаса параметров. Выполненное исследование содержит научную новизну в разработанных методических подходах к определению приоритетных участков сети зеленой инфраструктуры, одновременно важных как для сохранения биоразнообразия, так и для развития рекреационно-эстетических качеств зеленых насаждений.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура, урбанизированные экосистемы, ГИС-моделирование, связность, фрагментированность зеленых насаждений, MSPA-анализ.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10149

Озеленение является одним из основных экологических способов оздоровления и благоустройства городской среды (Голубчиков, 2001). Поддержание зеленой инфраструктуры в качестве источника экосистемных услуг является ключевым направлением устойчивого развития городов (Wei et al., 2018). Тем не менее, единство экологического каркаса зачастую оказывается ограничено снижением связности зеленой инфраструктуры и высокой степенью фрагментированности зеленых насаждений (McNicoll, 2005). Поэтому важной задачей становится не только планирование внедрения новых зеленых насаждений и управление ими, но и последующий анализ их функциональных свойств.

Урбанизированные территории как таковые являются сложными и многообразными системами, и анализ их эволюции зачастую страдает из-за нехватки пространственных данных и недостаточного понимания влияния социально-экономических и физико-географических факторов. С учетом этих ограничений, Европейское Средиземноморье, непрестанно развивающееся за счет активного вовлечения туристических ресурсов, является одним из самых благоприятных регионов для проведения такого рода исследований.

Средиземноморский климат, сухой и жаркий, сильно влияет на необходимость обеспечивать город развитой зеленой инфраструктурой. Тень от зеленых насаждений помогает смягчить высокие температуры, а использование таких элементов, как, например, зеленые крыши, благоприятствует снижению энергопотребления для охлаждения помещений и повышению эстетического облика городов.

В основном, в научной литературе анализ принципа связности заключается в оценке способности

зеленой инфраструктуры сохранять местообитания животных и предоставлять видам возможность мигрировать (Liquete et al., 2015). Из-за этого многие научные работы на тему связности не имеют прямого отношения к городским системам. Скорее, они сфокусированы на анализе зеленой инфраструктуры пригородов крупных агломераций, или же сельских районов. Тем не менее, в контексте зеленой инфраструктуры идея связности так же важна, как и принцип её многофункциональности, то есть её способности осуществлять на любой территории множество различных функций (Hansen et al., 2014).

Настоящее исследование предлагает набор пространственных индикаторов, которые помогут оценить степень связности элементов городской зеленой инфраструктуры города Малага. Ландшафтная связность может быть рассчитана с использованием интегрального индекса связности (IIC) и вероятности связности (PC) – индикаторов, основанных на теории графов (Flynn, Traver, 2013). В качестве альтернативы может использоваться метод морфологического пространственного анализа (MSPA), который обеспечивает более гибкий подход к учету связности зеленой инфраструктуры. MSPA ориентируется на геометрию и связность компонентов на основе растрового изображения изучаемой территории, и может автоматически идентифицировать существующие экологические коридоры (Batty, Rana, 2002).

В качестве объекта исследования был избран город Малага (рис. 1), где стремительный рост населения, начиная с 1960-х годов, поставил ряд вопросов, касающихся эффективности городского планирования, включая сферу озеленения.

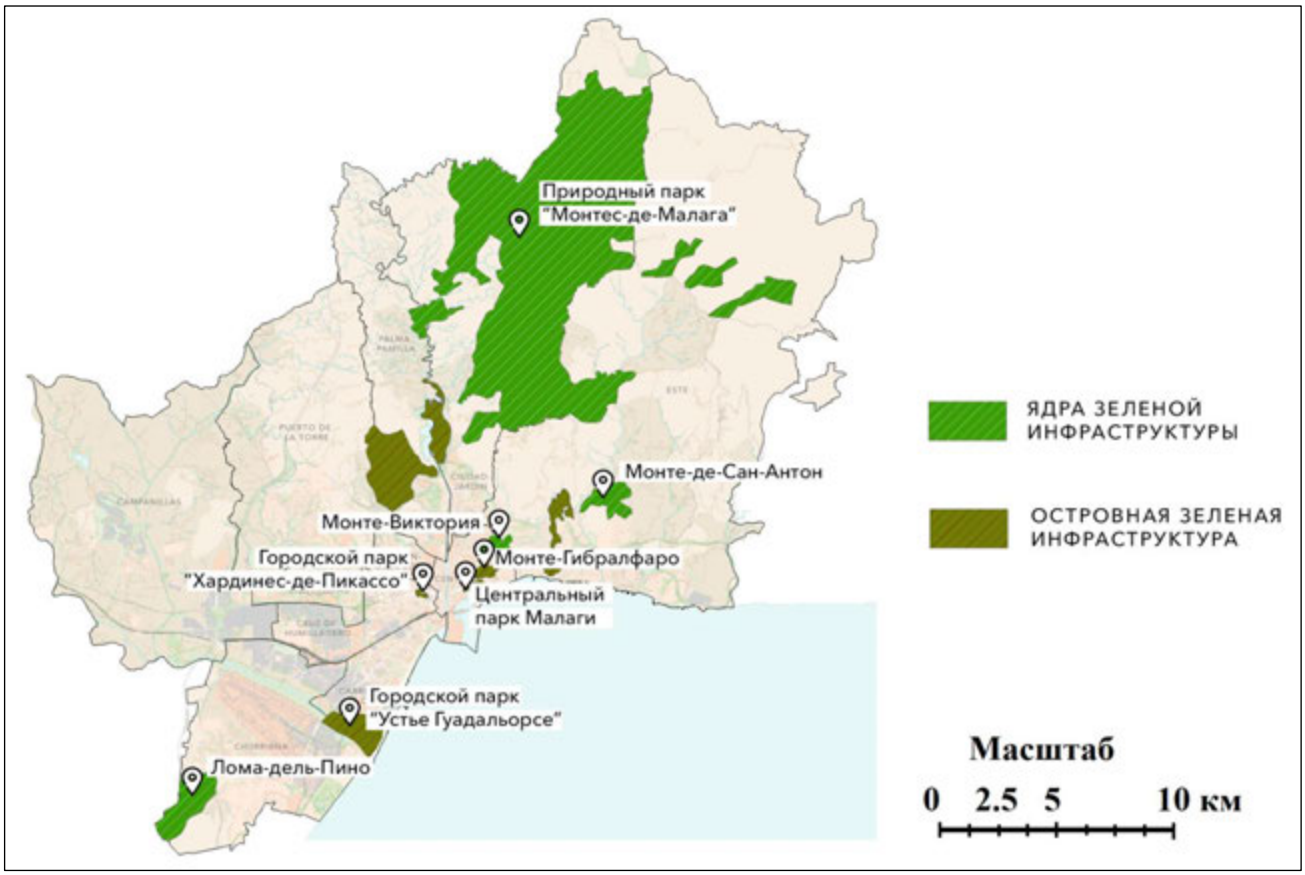

Рис. 1. Крупные элементы зеленой инфраструктуры г. Малага.

Основной целью этого исследования является оценка связности элементов зеленой инфраструктуры Малаги как одного из важнейших геоэкологических компонентов городской системы. В контексте работы были поставлены задачи применить новый методический подход к анализу структуры зеленых насаждений и фрагментов природного ландшафта в городе (морфологический пространственный анализ) и на основании построенной модели провести оценку

критически значимых параметров связности и фрагментированности зеленых насаждений.

Материалы и методы

Уникальной особенностью метода морфологического пространственного анализа (MSPA) является автоматическое обнаружение экологических коридоров разного масштаба между основными функциональными ядрами изображения, а также последующее ранжирование этих обнаруженных путей с учетом относительной важности каждого компонента − узла или коридора − в данной сети (Vogt, Riitters, 2017). Кроме того, метод MSPA требует только растровые данные о землепользовании региона и соответствующее программное обеспечение, то есть, метод чрезвычайно легок в применении.

Для извлечения элементов зеленой инфраструктуры Малаги было использовано некоммерческое программное обеспечение GuidosToolBox (The Graphical User Interface for the Description of Objects and their Shapes Toolbox). Все инструменты GuidosToolbox основаны на геометрических принципах и, следовательно, могут применяться в любом масштабе и для любых видов растровых данных. GTB использует для представления объектов землепользования в бинарном изображении, в котором пространственное положение каждого пикселя определяется кодом «1» или «0» (где «1» − передний план, то есть именно изучаемые элементы ландшафта, «0» − задний план). В данном случае, «1» представляет собой собственно зеленую инфраструктуру (передний план), а «0» − городскую застройку (задний план).

Результат анализа сильно зависит от параметра Edge Width. Увеличение Edge Width увеличивает область фона за счет основной области переднего плана, и, соответственно, может изменить класс MSPA. В данной работе параметр Edge Width равняется 4 пикселям.

Область переднего плана бинарного изображения разделена на семь общих классов MSPA: ядро (Core), остров (Islet), окно (Perforation), край (Edge), петля (Loop), коридор (Bridge) и ответвление (Branch; табл. 1). Эта сегментация приводит к взаимоисключающим классам, которые при слиянии точно соответствуют исходной области переднего плана. Область заднего плана изображения подразделяется на три класса: фон (Background), просвет окна (Core Opening) и окаймление (Border Opening).

Таблица 1. Классы переднего и заднего планов и их пространственное значение.

Класс	Пространственное значение
Ядро (Core)	Пиксели зеленой инфраструктуры, окруженные со всех сторон также пикселями переднего плана на расстояние, превышающее указанное.
Остров (Islet)	Пиксели зеленой инфраструктуры, не окружающие ядро. Это единственный не связанный класс.
Окно (Perforation)	Пиксели зеленой инфраструктуры, формирующие переходную зону между передним планом и фоном для внутренних областей.
Край (Edge)	Пиксели зеленой инфраструктуры, формирующие переходную зону между передним планом и фоном для внешних областей.
Коридор (Bridge)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые соединяют два или более непересекающихся ядра.
Петля (Loop)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые соединяют область ядра с самой собой.
Ответвление (Branch)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые тянутся от области ядра, но не соединяются с другой областью ядра.
Просвет окна (Core Opening)	Пиксели заднего плана, формирующие внутреннюю зону отверстия.
Окаймление (Border Opening)	Пиксели заднего плана, формирующие переходную зону между краем и фоном.
Фон (Background)	Пиксели заднего плана, окруженные со всех сторон также пикселями заднего плана на расстояние, превышающее указанное.

MSPA-анализ ориентирован на выявление важнейших показателей экологического состояния среды (в данном случае − городской), и с его помощью можно решать целый спектр различных проблем, касающихся управления и сохранения экосистем. Метод применим в различных сферах, связанных с оптимизацией городской среды и генеральным планированием городов, и его использование делает возможной оценку изменений состояния экосистем, получение более чёткого представления о существующих геоэкологических проблемах и путях их решения; пространственный анализ предоставляет информацию, необходимую для определения приоритетов дальнейших исследований.

Инструменты Contagion и Entropy, принадлежащие к группе инструментов Fragmentation, помогают определить степень фрагментации ареалов зеленой инфраструктуры города. Инструменты имеют важное различие: в то время как оценка фрагментации на основе энтропии (Entropy) основана на одновременной оценке переднего плана и фона (как единое целое), параметр сцепленности (Contagion) основан на рассмотрении только объектов переднего плана (Vogt, 2015). Соответственно, для анализа зеленой инфраструктуры изолированно от анализа всей городской системы использовался инструмент Contagion, сосредотачивающийся исключительно на объектах переднего плана.

Фрагментация выражается в виде процентной шкалы, где показатели, стремящиеся к 0%, указывают на минимальную степень фрагментации ареала, тогда как стремящиеся к 100% характерны для ареалов с максимальной фрагментацией.

Не менее полезным подходом к изучению фрагментации зеленой инфраструктуры является инструмент FAD (Foreground Area Density). FAD-анализ проводится путем измерения показателя плотности пикселей переднего плана по пяти шкалам наблюдения (с использованием метода moving window analysis) с квадратными соседними участками длиной в 7, 13, 27, 81, 243 пикселя (Riitters et al., 2012). Результатом проведенного анализа служит набор карт с разными результатами для каждого выбранного масштаба наблюдения. Значения FAD отображаются цветовым кодированием по следующим классам единства инфраструктуры: редкий (Rare), прерывистый (Patchy), переходный (Transitional), господствующий (Dominant), существенный (Interior), цельный (Intact).

Результаты и обсуждение

По результатам морфологического пространственного анализа территория города была поделена на ареалы, относящиеся к каждому из 10 пространственных классов (рис. 2).

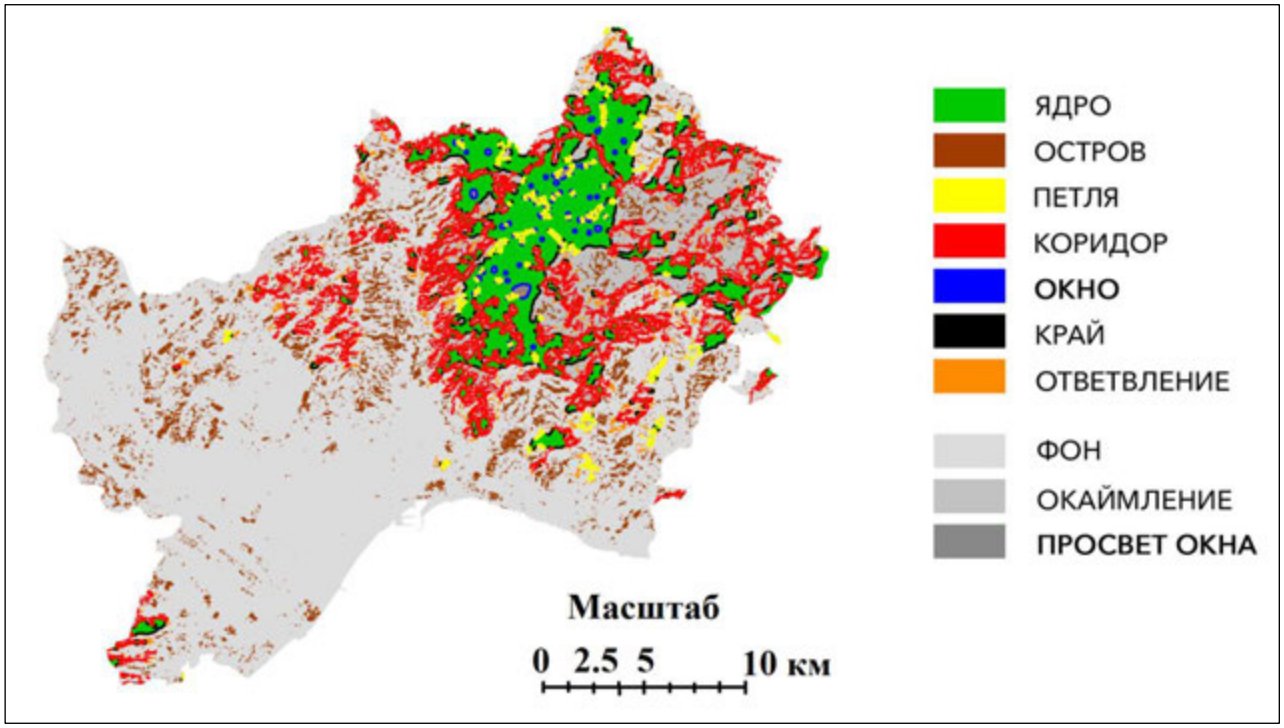

Рис. 2. Результаты MSPA-анализа для территории города Малага.

Ядра представляют собой крупные базовые резерваты, наиболее связанные между собой. В Малаге ядрами системы зеленой инфраструктуры в первую очередь являются Природный парк Монтес-де-Малага, занимающий большую часть северо-восточного района Сьюдад-Хардин, парк Лома-дель-Пино («Сосновый холм») на юго-западе района Чурриана, парк «Монте-де-Сан-Антон» в районе Эсте, лесной парк «Монте-Виктория» в центре города. В общей сложности ядра зеленой инфраструктуры занимают около 9% территории города, составляя 34.1 км^2 (рис. 3).

Ядра представляют собой крупные базовые резерваты, наиболее связанные между собой. В Малаге ядрами системы зеленой инфраструктуры в первую очередь являются Природный парк Монтес-де-Малага, занимающий большую часть северо-восточного района Сьюдад-Хардин, парк Лома-дель-Пино («Сосновый холм») на юго-западе района Чурриана, парк «Монте-де-Сан-Антон» в районе Эсте, лесной парк «Монте-Виктория» в центре города. В общей сложности ядра зеленой инфраструктуры занимают около 9% территории города, составляя 34.1 км^2 (рис. 3).

Островная зеленая инфраструктура занимает меньшие площади (27.5 км^2), при этом имея намного большую пространственную фрагментацию. К крупным островкам зеленой инфраструктуры относятся: парк устья р. Гуадальорсе, естественная растительность вдоль течения р. Кампанийяс, парк «Монте-де-Гибралфаро», а также значительная часть районов Пуэрто-де-ла-Торре, Эсте и Кампанийяс. В центре города островная зеленая инфраструктура включает в себя уличный парк Хардинес-де-Пикассо («Сады Пикассо») и Центральный парк Малаги, являющийся одной из главных достопримечательностей города. Однако, несмотря на близкое расположение этих зеленых насаждений друг к другу, сильная фрагментация зеленой инфраструктуры в центральной части города не позволяет говорить о связности. Почти все крупные элементы зеленой инфраструктуры в пределах городского ядра являются островными – это городские парки и скверы, сады и площадки для отдыха и рекреации.

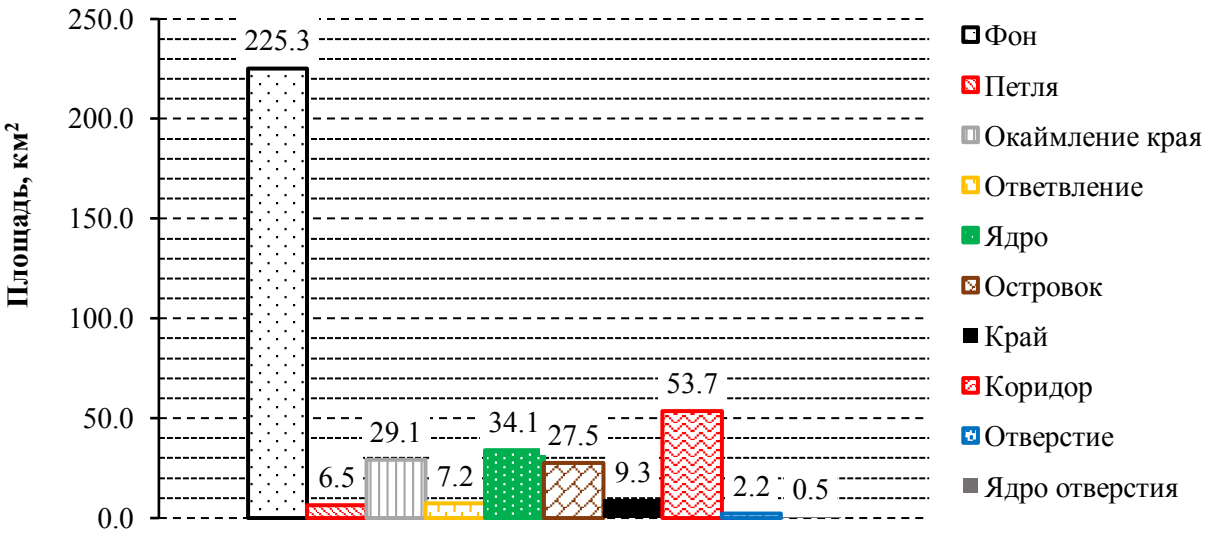

Рис. 3. Общая площадь каждого класса по результатам MSPA-анализа.

Значительная часть города покрыта «коридорами» − участками растительности, которые соединяют непересекающиеся ядра зеленой инфраструктуры между собой. Общая площадь таких коридоров составляет почти 53.7 км^2 и превышает площадь самих ядер. Самую большую территорию коридоры занимают в районе Эсте. Также большие площади растительности данного класса произрастают в районах Пальма-Памийя и Пуэрто-де-ла-Торре.

В целом, наибольшее внимание в исследовании связности городской зеленой инфраструктуры должно уделяться ядрам и коридорам; остальные элементы по большей части не способствуют увеличению или уменьшению структурной связности системы.

В случае Малаги, минимальной фрагментацией (инструмент Contagion) характеризуются в

первую очередь ядра, где степень фрагментации не превышает 15% (рис. 4). Существенная часть ареалов характеризуется средней степенью фрагментации – в пределах 30-60%; это зеленая инфраструктура районов Пуэрто-де-ла-Торре, Кампанийяс и Палма-Памийя. Интересно, что, несмотря на небольшую площадь и разбросанность по территории, зеленая инфраструктура в центральном районе города также характеризуется средней степенью фрагментации, менее 50%. Наиболее «разорвана» зеленая инфраструктура в районе Чурриана, где большая часть зеленых насаждений является островной, и, следовательно, фрагментированной с показателем в 80% и более.

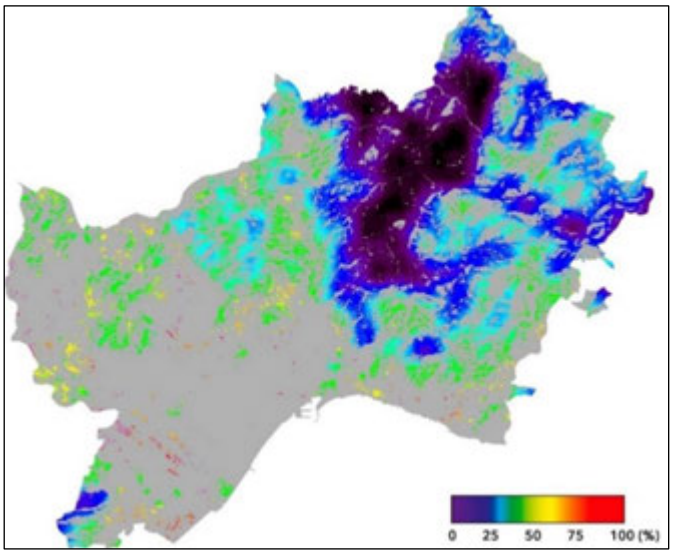

Рис. 4. Фрагментация зеленой инфраструктуры Малаги (инструмент Contagion).

Зеленая инфраструктура в Малаге (включая сосновые и дубовые массивы, сельскохозяйственные угодья, водно-болотные угодья устья Гуадальорсе и т.д.) была сильно фрагментирована в первую очередь активным расширением плотной жилой застройки по северо-западному лучу в течение последних нескольких десятилетий. Это расширение территории оказывает огромное давление на биоразнообразие региона в связи с уменьшением связи между становящимися все более и более изолированными участками зеленой инфраструктуры.

FAD-анализ на разных шкалах наблюдения представляет интерес, так как зачастую могут быть получены если не диаметрально противоположные, то крайне различные результаты.

Анализ территории Малаги на минимально детальной шкале (7 пикселей) наблюдения показал, что 29% зеленой инфраструктуры являются целостными и нетронутыми, а 18.2% и 28.8% относятся к классам существенного и господствующего единства инфраструктуры (рис. 5). Фрагментированная растительность составляет около 23.8% территорий переднего плана (где переходный класс занимает 13.7%, прерывистый – 9.4%, а редкий – 0.7%).

Главное отличие результатов по наиболее детальной шкале наблюдения (243 пикселя) – это полное отсутствие класса цельной растительности.

Более того, класс существенной целостности занимает менее 1% территории, а наименее фрагментированные участки (Монтес-де-Малага и местность рядом с небольшим поселением Эспартерос на восточной окраине города) принадлежат к классу господствующей целостности и занимают 43.2% переднего плана. Около 1.3% занимают максимально фрагментированные участки зеленой инфраструктуры в районах Чурриана, Пуэрто-де-ла-Торре и Сентро. Второй по обширности, прерывистый класс занимает 31.7% территории; стоит отметить, что из крупных, туристически привлекательных островков зеленой инфраструктуры к этому классу относятся парки Монте-Виктория, Монте-де-Гибралфаро и Монте-де-Сан-Антон. Оставшаяся часть переднего плана (около 23%) приходится на переходный класс.

Выводы

Метод пространственного морфологического анализа применительно к оценке связности элементов зеленой инфраструктуры г. Малаги дал однозначные результаты. Было выделено около 5-6 крупных ядер зеленой инфраструктуры внутри сети зеленых насаждений. Лишь эти немногочисленные ядра соединены между собой коридорами и имеют петли, благоприятствующие миграциям животных. Несмотря на относительно высокие коэффициенты обеспеченности населения зеленой инфраструктурой и обширные площади насаждений (согласно нормативным документам

градостроительного проекта Agenda Urbana Málaga), большая часть зеленых насаждений имеет островной (фрагментарный) характер и низкий параметр связности элементов зеленой инфраструктуры, что не способствует созданию единой сети и экологического каркаса как такового.

ГИС является ключевым инструментом, при помощи которого можно как направлять внимание на отдельные особенности ландшафта, так и исследовать их в совокупности. Метод морфологического пространственного анализа имеет определенные ограничения, в первую очередь связанные с определением масштаба входных данных, так как разные ландшафтно-экологические проекты требуют различной детальности изучения. От пользователя требуется понимание того, какой масштаб подходит для конкретного применения MSPA-метода. Результаты оценки пространственно-зависимых параметров сцепленности и фрагментации могут также зависеть не только от уровня, на котором проводится анализ, но и от экологических процессов, анализируемых в рамках ландшафтной матрицы. Также заметным ограничением является невозможность дифференциации зеленой инфраструктуры по морфометрическим показателям (параметрам высоты и уклона местности), принадлежности к сетке элементарных водосборов и прочим пространственным характеристикам в трёхмерной системе координат реального пространства.

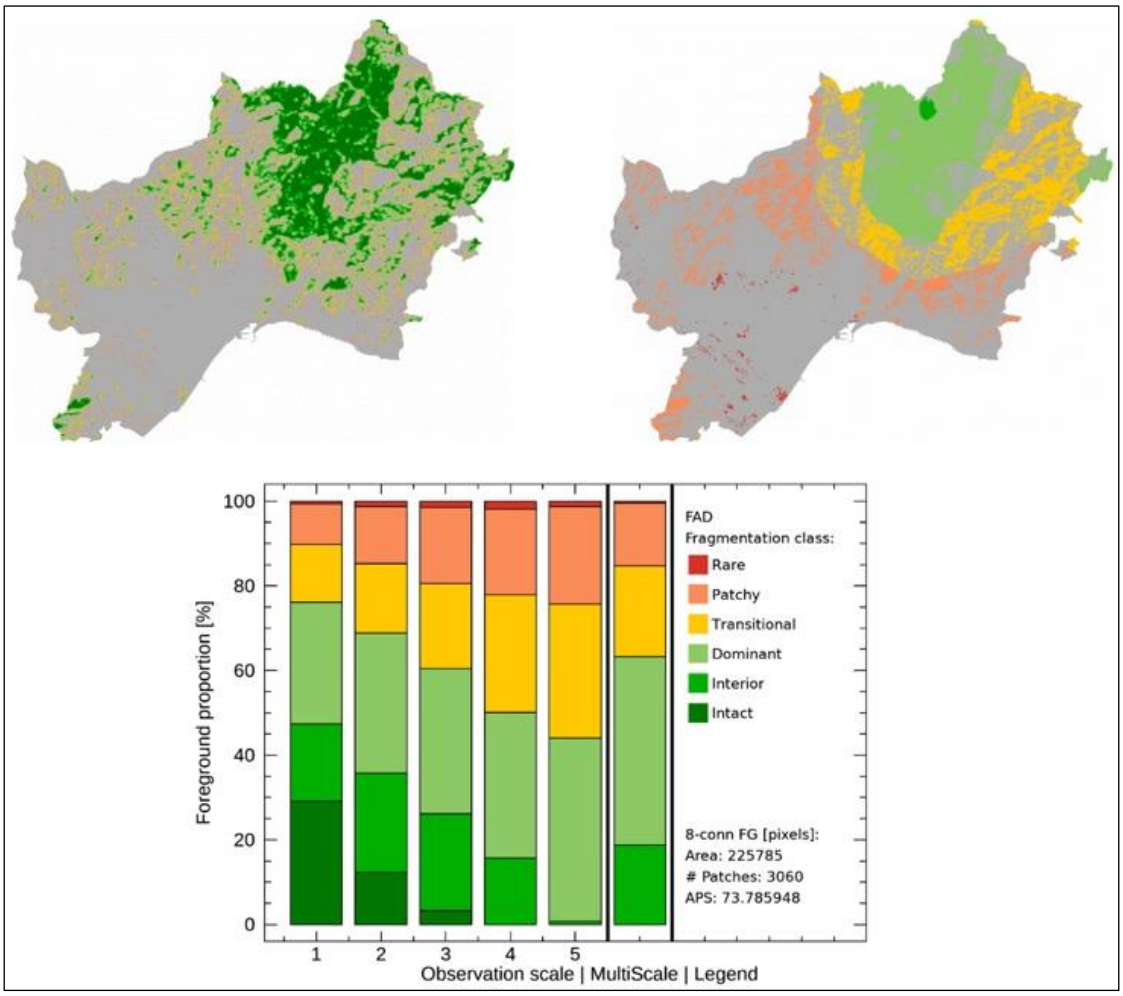

Рис. 5. FAD-анализ (Foreground Area Density) зеленой инфраструктуры Малаги по наименее (1, слева) и наиболее (5, справа) детальным шкалам наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голубчиков С.Н., Минин А.А., Гутников В.А. 2001. Пути оптимизации городской среды // Экология крупного города (на примере Москвы). Учебное пособие. Пасьва М. 192 с.

Agenda Urbana Málaga. Indicadores de Sostenibilidad 2016. Territorio y configuración de la ciudad [Электронный ресурс http://static.omau-malaga.com/omau/subidas/archivos/6/2/arc_7726_v2.pdf (дата обращения 14.04.2020)].

Batty M., Rana S. 2002. Reformulating Space Syntax: The Automatic Definition and Generation of Axial Lines and Axial Maps. Centre for Advanced Spatial Analysis Working Paper 58; Centre for Advanced Spatial Analysis University College London: London, UK. 42 p.

Flynn K.M., Traver R.G. 2013. Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study // Ecological Engineering. No. 55. P. 9-22.

Hansen R., Pauleit S. 2014. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas // Ambio. Vol. 43 (4). P. 516-529.

Liquete C., Kleeschulte S., Dige G., Maes J., Grizzetti B., Olah B., Zulian G. 2015. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study // Environmental Science & Policy. No. 54. P. 268-280.

McNicoll G. 2005. United Nations. Department of Economic and Social Affairs: World Economic and Social Survey 2004: International Migration // Population and Development Review. No. 31. P. 183-185.

Riitters K.H., Coulston J.W., Wickham J.D. 2012. Fragmentation of forest communities in the eastern United States // Forest Ecology and Management. No. 263. P. 85-93.

Vogt P., Riitters K. 2017. GuidosToolbox: universal digital image object analysis // European Journal of Remote Sensing. No. 50. P. 352-361.

Vogt P. 2015. Quantifying landscape fragmentation. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. João Pessoa-PB, Brasil. P. 1239-1246.

Wei J., Qian J., Tao Y., Hu F., Ou W. 2018. Evaluating Spatial Priority of Urban Green Infrastructure for Urban Sustainability in Areas of Rapid Urbanization: A Case Study of Pukou in China // Sustainability. No. 10. P. 327.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 49-56

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 574.9:633.8

ПРИРОДНО-РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ФЛОРЫ ОФИЦИНАЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ ПРЕДКАВКАЗЬЯ[1]

© 2021 г. Н.Б. Леонова, И.М. Микляева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: nbleonova2@gmail.com, inessa-miklyaeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.11.2020. После доработки 01.12.2020. Принята к публикации 02.12.2020

Исследование природно-ресурсного потенциала официнальных растений Предкавказья, разрешенных к использованию в медицинской практике, проведено на основе базы данных, разработанной авторами при создании Медико-географического атласа России «Целебные источники и растения» (2019). Флора дикорастущих и возделываемых в открытом грунте официнальных растений Предкавказья включает 153 вида из 126 родов и 54 семейств. В ее составе преобладают виды семейств Asteraceae, Orchidaceae, Rosaceae и Apiaceae. Большинство видов произрастает в лесных и кустарниковых сообществах, многие растения возделывают на плантациях. Предкавказье по природным особенностям делят на три части: западную и центральную с более благоприятными условиями для растений и восточную – менее благоприятными, что отражается в региональной специфике распределения официнальных растений: в западной и центральной части их число вдвое больше, чем в восточной. Благодаря разнообразию фармакологических свойств растений и высокому содержанию действующих веществ официнальные растения применяют для лечения заболеваний, относящихся к 14 классам болезней по международной классификации ICD-10. В основном их используют при лечении заболеваний желудочно-кишечного тракта, а также органов дыхания и органов системы кровообращения. Благоприятные природные условия позволяют вводить в культуру аборигенные (19 видов) и интродуцированные (62 вида), в основном из субтропических и тропических регионов. Массовая заготовка лекарственного растительного сырья сокращает популяции многих видов дикорастущих растений. Из них в Красную книгу РФ включены 13 видов, в региональные Красные книги –12 видов растений.

Ключевые слова: таксономическое разнообразие, региональная специфика, действующие вещества, классы болезней, рациональное использование и охрана.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10150

Медицинская промышленность широко использует сырье лекарственных растений для изготовления препаратов, однако и в настоящее время остается актуальным исследование географии и экологии официнальных (от лат. *officina* – аптека), а также перспективных для медицинского использования растений в Российской Федерации. Региональные различия природно-ресурсного потенциала флоры официнальных растений обусловлены климатической и геолого-геоморфологической спецификой отдельных регионов, фармакологической изученностью флоры, а также эмпирическими знаниями, накопленными населением об их применении для лечения различных заболеваний. Официнальные растения, прошедшие клинические испытания и разрешенные для использования в медицинской практике Министерством здравоохранения РФ, включаются в государственные фармакопеи (Фармакогнозия …, 2010). Для получения лекарственных препаратов преимущество имеют растения южных регионов РФ, т.к., произрастая в условиях достаточной теплообеспеченности на почвах, богатых питательными веществами, они накапливают более высокие концентрации биологически активных веществ в сравнении с растениями северных

[1] Исследование поддержано Русским Географическим Обществом (Проект № 02/2017-И) “Медико-географический атлас России "Целебные источники и растения" (РГО)”.

регионов. В связи с этим изучение лекарственных растений Предкавказья, важной сырьевой базы химико-фармацевтической промышленности, имеет научное и практическое значение. *Цель исследования* – характеристика природно-ресурсного потенциала официнальных растений Предкавказья. В число основных *задач* входят: выявление таксономического и эколого-географического разнообразия флоры официнальных растений, как аборигенных, так и интродуцированных; характеристика фармакологических свойств официнальных растений, их применения для лечения заболеваний, относящихся к основным классам болезней по международной классификации болезней, выявление мер, направленных на сохранение популяций официнальных растений.

Материалы и методы

Территория исследования. Предкавказье – физико-географический район на юге России, с запада ограниченный побережьем Азовского моря (37° 35' в.д.) и Керченского пролива (36° 37' в.д.), с севера – Кумо-Манычской впадиной (47° 05' с.ш.), с востока – Каспийским морем (47° 22' в.д.), с юга – подножием северного склона Большого Кавказа (44° 22' с.ш.). Это преимущественно равнинная территория с холмистым и низкогорным рельефом в средней части, протяженностью с запада-северо-запада на восток-юго-восток более 900 км, с севера на юг – до 300 км. По комплексу природных условий Предкавказье разделяют на три части: западную, центральную и восточную. Климат западной и центральной частей степной, умеренно-континентальный со средними температурами июля 21-24°С, января -2--5°С. В западном Предкавказье на Кубано-Приазовской низменности среднегодовое количество осадков достигает 450-600 мм с максимумом в июне-июле. В центральном Предкавказье (Ставропольский край) осадков несколько больше – 600-800 мм. Развиты плодородные почвы – черноземы с высоким содержанием карбонатов: карбонатные черноземы, остаточно-карбонатные черноземы, темно-каштановые и каштановые почвы (Петрушина и др., 2013). В растительном покрове зональными являются разнотравно-типчаково-ковыльные степи с участками луговых степей. В настоящее время практически все степи региона распаханы. В восточном Предкавказье природные условия более континентальные и засушливые: в пределах Терско-Кумской низменности климат пустынно-степной с температурами воздуха в июне 25-26°С, в январе – -5-7°С, годовое количество осадков сокращается до 200-300 мм, возможны продолжительные засухи. Почвы бедные питательными элементами – светло-каштановые, местами засоленные; рельеф равнинный, на юге с эоловыми формами. В растительном покрове распространены дерновиннозлаково-полынные остепненные пустыни, на засоленных участках – солянковые сообщества. Длительное хозяйственное освоение территории, в том числе выпас, привели к трансформации естественных сообществ (Петрушина и др., 2013).

Работа основана на материалах Базы данных лекарственных растений России, разработанной авторами в процессе создания Медико-географического атласа России «Целебные источники и растения» (2019). Материалы объединены на основе Web-GIS технологий в информационно-поисковую систему, реляционная таблица составлена в программе MS Excel. Атрибуты представлены в 42 столбцах (таксономическая привязка видов, распространение, биологические особенности, химический состав, показания и противопоказания к применению при лечении заболеваний, относящихся к основным классам болезней и др.); в 239 строках для России дан список видов дикорастущих и выращиваемых в открытом грунте официнальных растений. Для Предкавказья проведена выборка 153 видов лекарственных растений, содержащая их полную характеристику. Классы болезней приведены в соответствии с международной классификацией МКБ-10, разработанной Всемирной организацией здравоохранения (International Statistical Classification ..., 2020), названия растений даны в соответствии с международной ботанической номенклатурой (The Plantlist, 2020). При оценке природно-ресурсного потенциала Предкавказья использован сравнительно-географический, эколого-географический и медико-географический методы исследований.

Результаты исследования

Флора официнальных растений Предкавказья включает 153 вида из 126 родов и 54 семейств, или 63% всех видов официнальных растений России и 6% от флоры Предкавказья, насчитывающей 2353 вида сосудистых растений, относящихся к 744 родам и 150 семействам (Иванов, 1998). Во флоре

официнальных растений наиболее представительны четыре семейства (рис. 1): Asteraceae (22 вида), Orchidaceae (12), Rosaceae (10) и Apiaceae (10). Большим числом видов представлены роды: *Orchis* (8 видов), *Polygonum* (4), *Verbascum* (3) и *Cucurbita* (3); 11 родов содержат по 2 вида, в оставшиеся 111 родов входят всего по одному виду. В составе жизненных форм преобладают криптофиты (76 видов) значительно число терофитов (44 вида), фанерофиты представлены 14 видами кустарников и 12 видами деревьев. Незначительным числом видов представлены хамефиты (2 вида кустарничков), 2 вида полукустарничков и 1 вид полукустарников.

Разнообразие природных условий, обусловливает разнообразие *дикорастущих и возделываемых в открытом грунте официнальных растений*. Практически все виды официнальных растений Предкавказья – 150 видов, произрастают в западной и центральной частях Предкавказья. С усилением континентальности климата в восточной части Предкавказья, разнообразие официнальных растений снижается до 67 видов.

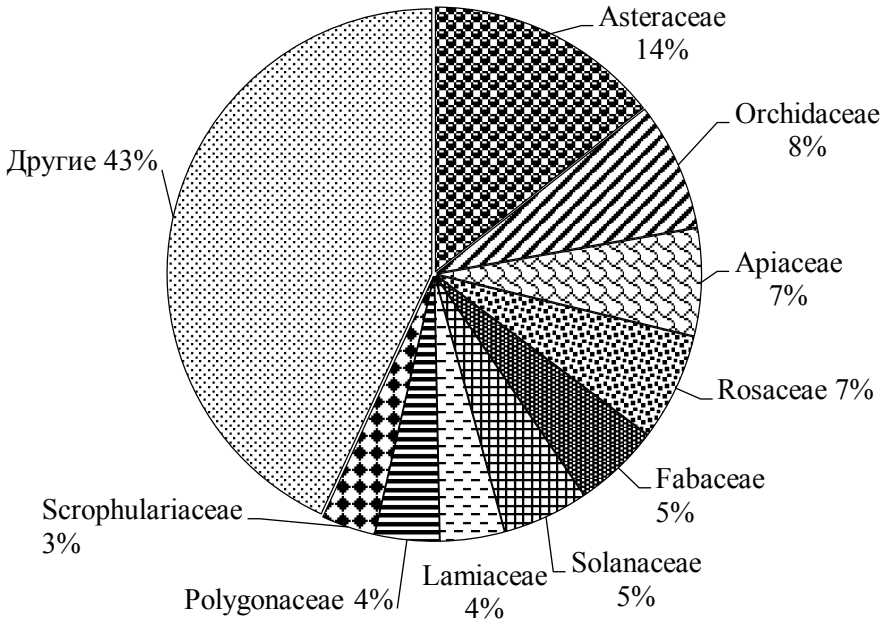

Рис. 1. Таксономический спектр флоры официнальных растений Предкавказья.

Число *дикорастущих видов официнальных растений* в Предкавказье достигает 110 (72% от общего числа официнальных видов растений Предкавказья). Из них большее количество видов – 48 (44% от числа дикорастущих) произрастает в разных типах лесов, например, *Quercus robur* L., *Astragalus falcatus* Lam., а также в зарослях кустарников – *Bryonia alba* L., *Rubia iberica* C. Koch. В связи со значительной распашкой равнинных территорий, в каждом из наиболее характерных типов биотопов (степях и степных лугах) произрастает по 18 видов официнальных растений (по 16%). Например, в степных – *Artemisia taurica* Willd., *Echinops ritro* L., в степных лугах – *Hypericum perforatum* L., *Polygala sibirica* L. В прочих биотопах произрастают 26 видов (24%). В рудеральных биотопах отмечены, например, *Arctium lappa* L., *Datura stramonium* L.; в пахотных – дикорастущие виды, засоряющие посевы – *Centaurea cyanus* L., *Polygonum aviculare* L.; в водных и околоводных – *Acorus calamus* L., *Polygonum hydropiper* L.; на болотах и сырых лугах – *Bidens tripartita* L. *Orchis palustris* Jacq.; на деревьях паразитирует омела белая *Viscum album* L. Сбор дикорастущих официнальных растений для дальнейшего использования в химико-фармацевтической промышленности проводится как частными лицами, так и заготовительными компаниями. На территории Предкавказья существует ряд пунктов приема дикорастущего лекарственного сырья: 10 пунктов в Краснодарском крае, 2 – в Ставропольском крае, 2 – в Республике Дагестан (Медико-географический …, 2019).

Культивируемые официнальные растения. Для создания лекарственных препаратов большую часть сырья получают из культурных растений. Культивирование представляет собой сложный

процесс, основывающийся на направленной селекции. Ее задачи включают: сохранение и увеличение содержания в растениях действующих веществ; устранение свойств, характерных для дикорастущих растений, затрудняющих их возделывание и заготовку (неодновременное созревание и растрескивание плодов, осыпание семян, колючесть и др.); увеличение урожайности и устойчивости к вредителям и болезням (Селекция …, 1996).

В фитосовхозах и фермерских хозяйствах Краснодарского и Ставропольского краев (западная и центральная части Предкавказья) возделывают 62 вида официнальных растений – это практически все лекарственные растения, которые культивируют в РФ. Из них 19 видов – аборигенные растения, которые входят в состав естественных растительных сообществ, например, *Carum carvi* L., *Cichorium intybus* L., *Silybum marianum* (L.) Gaertn. Возделывание дикорастущих аборигенных видов на полях и плантациях позволяет достичь стабильных урожаев, большей продуктивности, создает возможность проведения селекционных работ. Таким образом, это обеспечивает надежную сырьевую базу для фармацевтической промышленности и в то же время способствует сохранению популяций ценных лекарственных растений в естественной среде. Как показывают исследования, показатели урожайности лекарственных растений выше на плантациях. Так, в естественных зарослях собирается 3-6 т корней солодки голой с 1 га (сухой вес), а на плантациях Ставропольского края – 10-17 т/га; травы пустырника – 5-6 ц/га в естественных условиях и 15 ц/га – на плантациях (Атлас …, 1980; Почупайло, 2019). Таким образом, лекарственное сырье культивируемых официнальных растений более рентабельно по сравнению с сырьем дикорастущих видов. При этом в природе лекарственные растения произрастают рассеянно в сообществах, нарушенные при заготовке популяции восстанавливаются очень медленно. При возделывании на плантациях, благодаря разработанным агротехнологиям, растения содержат стабильный состав и концентрацию лекарственных веществ, дают более высокую урожайность, чем в естественных условиях. Механизированные уборка урожая и заготовка сырья снижают его себестоимость, что позволяет хозяйствам получать хорошую прибыль.

Благоприятные климатические и почвенные условия Предкавказья позволяют возделывать 42 вида официнальных растений, интродуцированных из субтропических и тропических регионов мира. Наибольшее число видов завезено на плантации Предкавказья из районов Средиземноморья – такие растения, как *Melissa officinalis* L., *Ammi majus* L., *Ammi visnaga* (L.) Lam., *Rosa gallica* L., *Calendula officinalis* L. и другие, всего 13 видов (рис. 2). Климатические условия Предкавказья близки к средиземноморским по уровню теплообеспеченности и режиму увлажнения, географическая близость их природных ареалов обуславливают успешность интродукции средиземноморских растений. Широко распространены на плантациях выходцы из Центральной и Южной Америки (*Capsicum annuum* L., *Datura innoxia* Mill.); из Юго-Западной и Южной Азии – *Macleaya microcarpa* (Maxim.) Fedde; из Северной Америки – например, *Echinacea purpurea* (L.) Moench, из Китая и Японии – *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott, *Thea sinensis* L. Среди выращиваемых на плантациях есть интродуценты из Африки (*Ricinus communis* L.) и из Австралии – *Eucalyptus cinerea* F. Muell. ex Benth. Девять из интродуцированных возделываемых видов официнальных растений – повсеместно распространенные сельскохозяйственные культуры: лук *Allium cepa* L., тыква *Cucurbita pepo* L., кукуруза *Zea mays* L. и др. Наряду с пищевой ценностью, эти растения являются сырьем для создания многих лекарственных препаратов – аллохол (из чеснока), аллилчеп, аллилглицер (из лука), тыквеол, пепонен (из тыквы) и др.

Таким образом, культивирование официнальных растений в Предкавказье дает значительный вклад в формирование лекарственной сырьевой базы для химико-фармацевтической промышленности страны. Лекарственное растительное сырье из хозяйств Краснодарского и Ставропольского края поступает на крупнейшее предприятие фармацевтической промышленности в России – «Красногорсклексредства» (Московская область). Это корневища и корни девясила высокого, кора дуба черешчатого, лист мяты перечной, цветки пижмы обыкновенной и ромашки аптечной, семена укропа аптечного и др. (Медико-географический …, 2019). Потребность в них по стране исчисляется десятками тысяч тонн, однако при постоянном росте спроса российские предприятия работают в основном на импортном сырье. В настоящее время импорт лекарственного сырья составляет порядка 12 тыс. тонн, а экспорт всего 100-110 тонн (Почупайло, 2019). В пределах Предкавказья существует лишь несколько фармацевтических предприятий, специализирующихся на производстве препаратов из растительного сырья – это компании «Кубаньфарммед», «Фарос»,

Краснодарская фармацевтическая фабрика, «Фитофарм» в Анапе (Фарминдекс РФ, 2020).

Использование официнальных растений в медицинской практике. Возможность применения растений в медицине определяется составом биоактивных веществ. Они включают преимущественно природные вещества вторичного синтеза (алкалоиды, сапонины, гликозиды, дубильные вещества и др.; Фармакогнозия …, 2010; табл. 1). Изучением фармакологических свойств дикорастущих и культивируемых лекарственных растений, селекцией новых сортов и выбором перспективных для интродукции растений занимаются на опытных станциях, а также на коллекционных участках ботанических садов Предкавказья. Такие коллекции представлены в девяти ботанических садах государственных университетов или академий: во Владикавказе, Краснодаре, Майкопе, Махачкале (2 сада), Нальчике, Пятигорске (2 сада), Ставрополе. Некоторые из них (Ботанический сад Пятигорской фармацевтической академии; Горный Ботанический сад ДНЦ РАН в Махачкале) занимаются профессиональной подготовкой фармацевтов.

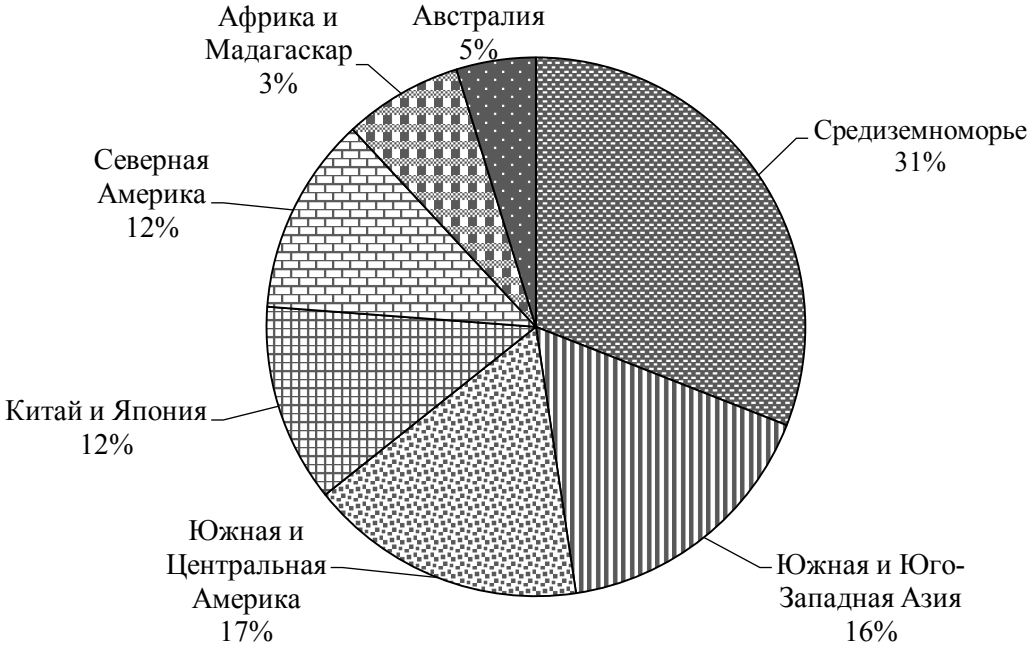

Рис. 2. Доли интродуцированных видов официнальных растений из разных регионов мира.

Таблица 1. Действующие вещества и фармакологические свойства официнальных растений.

Действующие вещества	Фармакологические свойства	Виды официнальных растений
Алкалоиды	Кардиотоническое, гемостатическое, отхаркивающее и др.	*Atropa belladonna* L., *Colchicum speciosum* Steven
Эфирные масла	Антимикробное, антисептическое	*Verbascum densiflorum Bertol., Digitalis purpurea* L.
Слизи	Обволакивающее, противоядное	*Althaea officinalis* L., *Orchis ustulata* L.
Биологически активные вещества	Усиливающее иммунитет, витамины	*Sambucus nigra L., Echinacea purpurea* (L.) Moench
Фенольные соединения	Антимикробное, антисептическое и др.	*Astragalus falcatus* Lam., *Ammi visnaga* (L.) Lam.

Наличие в Предкавказье официнальных растений с разными фармакологическими свойствами дает возможность разрабатывать на их основе препараты для проведения профилактики и лечения

заболеваний, относящихся к 14 классам болезней (по международной классификации МКБ-10; рис. 3). В каждом классе объединено большое количество заболеваний определенных органов или систем, поэтому для их лечения применяют растения с разными фармакологическими свойствами. Растения с высокой концентрацией алкалоидов – более 17% видов от общего числа дикорастущих и культивируемых официнальных растений (например, *Atropa belladonna* L., *Colchicum speciosum* Steven), обладают кардиотоническим, кровоостанавливающим, отхаркивающим и другими фармакологическими свойствами. Содержащие эфирные масла – 16% видов (*Verbascum densiflorum* Bertol., *Digitalis purpurea* L.) имеют противомикробное свойство. Содержащие слизи – 15% видов (*Althaea officinalis* L., *Orchis ustulata* L. и др.) имеют обволакивающий и противоядный эффекты. Многие растения (*Sambucus nigra* L., *Echinacea purpurea* (L.) Moench) содержат биоактивные вещества, оказывающие влияние на физиологические процессы. Растения, содержащие фенольные соединения, например, флавоноиды (*Astragalus falcatus* Lam., *Ammi visnaga* (L.) Lam.), обладают вяжущим и бактерицидным действиями и др. (табл. 1). Более 80 видов официнальных растений (52%) используют при лечении различных заболеваний желудочно-кишечного тракта (XI класс). Более 40 видов с противовоспалительным свойством используют при лечении заболеваний органов дыхания (X класс). Для лечения заболеваний органов системы кровообращения (IX) применяют более 40 видов растений.

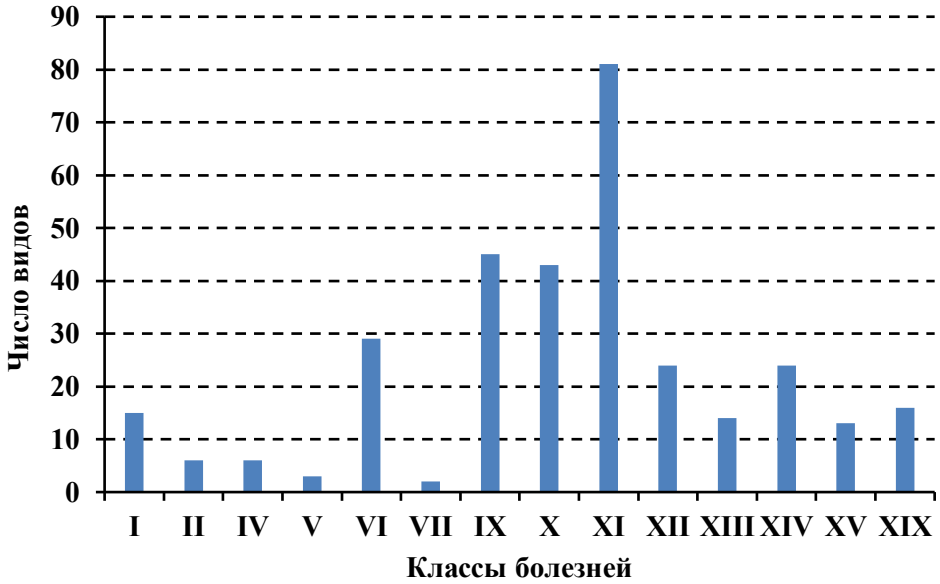

Рис. 3. Число видов официнальных растений Предкавказья , используемых при лечении заболеваний разных классов болезней. *Условные обозначения:* I – некоторые инфекционные и паразитарные болезни; II – новообразования; IV – болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ; V – психические расстройства и расстройства поведения; VI – болезни нервной системы; VII – болезни глаза и его придаточного аппарата; IX – болезни системы кровообращения; X – болезни органов дыхания; XI – болезни органов пищеварения; XII – болезни кожи и подкожной клетчатки; XIII – болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани; XIV – болезни мочеполовой системы; XIX – травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин (в соответствии с международной классификацией болезней ICD-10).

Охрана официнальных растений обеспечивает возможность эффективного и продолжительного использования их ресурсов. Меры охраны связаны с рациональным использованием, изучением и сохранением генофонда официнальных растений для селекции продуктивных и эффективных по фармакологическим свойствам сортов и получения новых лекарственных препаратов. Природные популяции *Althaea officinalis* L., *Artemisia taurica* Willd., *Melissa officinalis* L. и многих других видов при заготовке сырья часто нарушаются. Одной из действенных мер, обеспечивающих их сохранение, является введение природоохранного режима в местах их произрастания. В Предкавказье действуют

всего две ООПТ федерального ранга: Дагестанский государственный заповедник и Кисловодский национальный парк, которых недостаточно для сохранения лекарственных растений в естественных местообитаниях.

К мерам по сохранению редких и исчезающих видов официнальных растений относится включение их в федеральную и региональные Красные книги и, соответственно, запрещение заготовки в естественных местообитаниях. В настоящее время 13 видов официнальных растений включены в Красную книгу РФ (Красная …, 2008). Это издавна используемые человеком *Atropa bella-donna* L., *Colchicum speciosum* Steven, восемь видов орхидных из рода *Orchis* и др. Еще 11 видов официнальных растений представлено в региональных Красных книгах – Краснодарского (Красная …, 2007), Ставропольского краев (Красная …, 2002) и др. Среди них *Astragalus dasyanthus* Pall., *Helleborus caucasicum* A. Br. и реликтовый вид *Periploca graeca* L. (табл. 2).

Таблица 2. Официнальные виды растений, включенные в региональные Красные книги Предкавказья.

Виды растений	Красные книги регионов Предкавказья
Adonis vernalis L.	Краснодарский (Красная …, 2007), Ставропольский края (Красная …, 2002)
Althaea officinalis L.	Республика Калмыкия (Красная …, 2014)
Astragalus dasyanthus Pall.	Ставропольский край (Красная …, 2002)
Helichrysum arenarium (L.) Moench	Краснодарский край (Красная …, 2007)
Inula helenium L.	Краснодарский край (Красная …, 2007)
Lycopodium selago L.	Ставропольский край (Красная …, 2002)
Menyanthes trifoliata L.	Краснодарский край (Красная …, 2007)
Nuphar lutea (L.) Sm.	Краснодарский (Красная …, 2007) и Ставропольский (Красная …, 2002) края; Республика Калмыкия (Красная …, 2014), Республика Дагестан (Красная …, 2009)
Platanthera bifolia (L.) Rich.	Краснодарский (Красная …, 2007) и Ставропольский (Красная …, 2002) края
Helleborus caucasicum A. Br.	Краснодарский (Красная …, 2007) и Ставропольский (Красная …, 2002) края, Республика Карачаево-Черкессия (Красная …, 2013), Республика Дагестан (Красная …, 2009)
Periploca graeca L.	Ставропольский край (Красная …, 2002)

Заключение

Флора официнальных растений Предкавказья отличается высоким таксономическим разнообразием. В нее входят 153 вида из 126 родов и 54 семейств. Большее число видов содержат четыре семейства: Asteraceae, Orchidaceae, Rosaceae и Apiaceae. Дикорастущие виды растений составляют 72% от общего числа. По составу жизненных форм преобладают криптофиты и терофиты. Преимущественно они связаны с лесными и кустарниковыми сообществами по долинам рек, со степями и лугами. Значительное число видов возделывают на плантациях. Различия западной, центральной и восточной частей Предкавказья по комплексу природных факторов, обусловливают их различие в разнообразии видов официнальных растений: в западной и центральной частях произрастает 150 видов, в восточной – 67.

Официнальные растения Предкавказья обладают разнообразными фармакологическими свойствами, их применяют для лечения заболеваний, относящихся к 14 классам болезней по международной классификации. Наибольшее число используют при лечении заболеваний желудочно-кишечного тракта, органов дыхания, а также органов системы кровообращения.

Значительный природно-ресурсный потенциал флоры официнальных растений Предкавказья, включающий – 63% всех видов официнальных растений России, служит надежной базой

лекарственного растительного сырья для химико-фармацевтической промышленности, что гарантирует продолжительное использование отечественного сырья как в настоящем, так и в будущем времени. В настоящее время в западной и центральной частях Предкавказья возделывают 62 вида официнальных растений: девять видов культурных растений, 19 дикорастущих и 34 интродуцированных. Важно восстановление сети опытных станций, занимающихся селекцией и интродукцией лекарственных растений для их выращивания на плантациях. Для сохранения популяции дикорастущих видов официнальных растений необходимо обеспечение природоохранного режима в местах их массового произрастаниях, особенно, в отношении видов, включенных в Красную книгу Российской Федерации (2008) и региональные Красные книги (Красная …, 2002, 2007, 2009, 2013, 2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов А.Л. 1998. Флора Предкавказья и ее генезис. Ставрополь: Изд-во СГУ. 290 с.

Красная книга Карачаево-Черкесской Республики. 2013 / Ред. В. Г. Онипченко. Черкесск: Нартиздат. 360 с.

Красная книга Краснодарского края: Растения и грибы. 2007 / Ред. С.А. Литвинская. Краснодар: Дизайн Бюро. 639 с.

Красная книга Республики Дагестан. 2009 / Ред. Г.М. Абдурахманов. Махачкала: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Дагестан. 552 с.

Красная книга Республики Калмыкия. 2014. Том 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения растения и грибы. / Ред. Н.М. Бакташева. Элиста: НПП «Джангар». 199 с.

Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). 2008 / Ред. Ю.П. Трутнев. М.: Тов-во научн. изд. КМК. 885 с.

Красная книга Ставропольского края: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и животных. 2002. Т. 1: Растения / Ред. А.Л. Иванов. Ставрополь: Полиграфсервис. 384 с.

Медико-географический атлас России «Целебные источники и растения». 2019 / Ред. С.М. Малхазова. М.: Географический ф-т МГУ. 304 с.

Петрушина М.Н., Самойлова Г.С., Щербакова Л.Н., Хорошев А.В., Иванов А.Н. 2013. Физическая география России и сопредельных территорий М.: Географический факультет МГУ. 152 с.

Почупайло О.Е. 2019. Государственная поддержка предпринимательской деятельности в сфере производства лекарственного растительного сырья (на примере республики Крым). Дисс…. канд. эконом. наук. Симферополь: Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. 235 с.

Селекция, экология, технологии возделывания и переработки нетрадиционных растений. 1996 // Материалы V Международной научно-производственной конференции. Симферополь: Таврия. 334 с.

Фармакогнозия. Лекарственное сырье растительного и животного происхождения. 2010 / Ред. Г.П. Яковлев. СПб.: Спецлит. 863 с.

Фарминдекс РФ. Российский фармацевтический портал. 2020 [Электронный ресурс https://www.pharmindex.ru/proizvoditeli/ (дата обращения 23.03.2020)].

International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision (ICD-10). [Электронный ресурс https://icd.who.int/ (дата обращения 11.05.2020)].

The Plantlist. A working list of all plant species. 2020 [Электронный ресурс http://www.theplantlist.org (дата обращения 15.09.2020)].

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 57-67

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 599.735.53:591.5

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПОПУЛЯЦИЙ САЙГАКА РОССИИ И КАЗАХСТАНА[1]

© 2021 г. Т.Ю. Каримова, А.А. Лущекина, В.М. Неронов

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: rusmabcom@gmail.com

Поступила в редакцию 24.11.2020. После доработки 01.12.2020. Принята к публикации 02.12.2020

С начала XX в. численность сайгака (*Saiga tatarica tatarica* L., 1766) дважды резко сокращалась в результате деятельности человека. Но если в первый раз численность всех четырех популяций – Северо-Западного Прикаспия, Устюртской, Волго-Уральской и Бетпакдалинской – восстановилась и к 70-80-м годам прошлого века насчитывала более 1 млн. голов, то во второй раз (с начала XXI в.) увеличение количества этих копытных отмечено только для двух популяций – Волго-Уральской и Бетпакдалинской. Цель проведенного исследования заключалась в анализе биологических параметров четырех популяций и выяснении различий, позволивших сайгакам, обитающим на территории Волго-Уральского междуречья и Бетпакдалы, преодолеть фазу депрессии и начать восстанавливать свою численность. В конце XX века экономическая обстановка в государствах, где в то время был распространен сайгак, привела к росту браконьерства среди населения, что послужило причиной резкого сокращения общей численности этих копытных до 50 тыс. особей. Площадь основного ареала сократилась в 50 раз для популяции сайгаков Северо-Западного Прикаспия, в 2.4-5 раз для трех других популяций. Протяженность и массовость сезонных миграций также сократились, а сайгаки популяции Северо-Западного Прикаспия перешли практически к оседлому образу жизни. В период низкой численности для всех популяций отмечено уменьшение количества стад разного размера, встречаемых на протяжении всего года, а в 56-100% случаев регистрируются стада численностью до 50 голов. В начале 2000-х годов основные биологические параметры, характеризующие четыре популяции сайгака, были сопоставимы, причем доля взрослых самцов и выход молодняка на 1 самку в июле-августе в популяции Северо-Западного Прикаспия были выше, чем в трех других популяциях (11.5±1.9% и 0.81±0.18 экз. против 8.7±3.8% и 0.48±0.40 экз., соответственно). Рост численности Бетпакдалинской и Волго-Уральской популяций стал возможен благодаря государственной поддержке Казахстана, содействию международных фондов эффективной охраны, а также ведению просветительской работы среди населения, что позволило значительно снизить пресс браконьерства.

Ключевые слова: сайгак, численность, пространственное распределение, миграции, структура популяций, плодовитость.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10151

За последние 500 лет человеческая деятельность привела к исчезновению 869 видов живых существ (The IUCN …, 2007), а крупных млекопитающих, вес которых превышает 20 кг, не стало в более чем 80% наземных экосистем (Morrison et al., 2007). Еще около 150 лет назад, в пастбищных экосистемах преобладали крупные мигрирующие копытные (Frank et al., 1998), многие из которых впоследствии исчезли или сократили свою численность в результате расширения сельскохозяйственной деятельности, включая развитие животноводства, из-за потери или фрагментации мест обитания, строительства новых объектов, в том числе и линейной инфраструктуры (Harris et al., 2009), а также прямого преследования.

[1] Работа выполнена по теме НИР Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Госзадание № 0109-2019-0009 «Фундаментальные проблемы охраны живой природы и рационального использования биоресурсов».

История существования сайгака – обитателя открытых ландшафтов аридных пространств Евразии, похожа на качели – то он находился на грани исчезновения из-за массовой охоты; то снова многочисленные стада «возвращенных к жизни» сайгаков в периоды миграции насчитывали десятки тысяч особей (Жирнов, 1982).

Еще в начале XVIII века ареал сайгака (*Saiga tatarica tatarica* L., 1766) простирался от предгорий Карпат на западе до равнин Синьцзяна на востоке (Кириков, 1966). Чрезмерный промысел, индустриализация и сельскохозяйственное освоение этих территорий привели к тому, что в начале XX в. сайгак встречался только в нетронутых человеком самых глухих уголках Северо-Западного Прикаспия и Туранской низменности, а общая его численность оценивалась примерно в 1000 голов (Банников и др., 1961).

После того как в СССР в 1921 г. сайгак, как исчезающий вид, был взят под усиленную охрану и вступил в силу полный запрет охоты на него, а также благодаря высокой плодовитости вида, стал отмечаться постепенный рост численности. К середине прошлого века, после заселения антилопами пригодных для постоянного обитания участков степей и пустынь, сформировались четыре практически полностью обособленные популяции: Северо-Западного Прикаспия (СЗП), Волго-Уральская (ВУ), Устюртская (У) и Бетпакдалинская (БД). Высокая численность животных позволила в 1951 г. открыть промысел на территории Северо-Западного Прикаспия, а в 1954 г. – и в отдельных районах Казахстана.

В начале 1980-х гг. общая численность сайгака оценивалась примерно в 1.2 млн. голов (400 тыс. – в СЗП и 800 тыс. – в Казахстане; Сайгак …, 1998). Многочисленным стадам сайгака ничто не мешало сосуществовать с миллионными стадами мелкого и крупного рогатого скота: например, в конце 1980-х – начале 1990-х гг. в Калмыкии, где обитала основная популяция сайгака (СЗП), насчитывалось 3.38 млн. мелкого и 0.36 млн. крупного рогатого скота (Габунщина, 2010), а в Казахстане – 35.6 млн. и 9.7 млн., соответственно (Экономика …, 2020).

Распад Советского Союза, последовавшие за ним годы экономического кризиса, открытие границ и практически свободная внешняя торговля, а также увеличение спроса на рога сайгака в Китае и ряде стран Юго-Восточной Азии привели к росту браконьерства по всему ареалу. К началу 2000-х гг. ситуация выглядела критической, – на территории СЗП насчитывалось всего около 20 тыс. особей и менее 30 тыс. в трех популяциях, обитающих на территории Казахстана (Близнюк, 2009; Грачев и др., 2009).

Ряд жестких мер, предпринятых Правительством Казахстана, эффективные мероприятия по охране сайгака, подкрепленные научно-исследовательскими работами, эколого-просветительские мероприятия, проводимые среди местного населения, позволили переломить ситуацию для популяций, обитающих на территории Казахстана – их численность начала расти, достигнув к весне 2015 года 242.5 тыс. голов (Обзорный …, 2015). В то же время, на территории СЗП, несмотря на усилия по охране, предпринимаемые на разных уровнях, численность сайгака продолжала снижаться, и к 2015 г., согласно экспертным оценкам, составила всего 4-5 тыс. особей (Каримова, Лущекина, 2018). В последние два-три года специалистами отмечается тенденция к незначительному росту количества антилоп – около 6.35 тыс. голов в 2020 г. (Все о сайгаке …, 2020). Как было показано ранее (Каримова и др., 2020), высокая плодовитость вида, сохранившаяся в популяции сайгака СЗП и в условиях депрессии численности, не могла быть реализована в полной мере из-за крайне низкого уровня половозрелых самцов. Однако наблюдающееся улучшение половозрастной структуры популяции позволяет с некоторой осторожностью говорить об ее выходе из затянувшегося периода депрессии численности (Богун, 2019).

Цель проведенного исследования заключалась в анализе биологических параметров, характеризующих четыре популяции сайгака, и выяснении различий, позволивших сайгакам, обитающим на территории Волго-Уральского междуречья и Бетпакдалы, преодолеть фазу депрессии и начать восстанавливать свою численность. Для этого было выполнено сравнение пространственного размещения, этологической структуры, половозрастного состава и некоторых репродуктивных показателей, которые характерны для популяций сайгака ВУ, У, БД и СЗП.

Материалы и методы исследований

Для характеристики состояния популяций и проведения соответствующего анализа были собраны и структурированы все материалы по биологии сайгака четырех перечисленных выше

популяций, имеющиеся в открытых источниках (Фадеев, Слудский, 1982; Сайгак …, 1998; Близнюк, 2009; Грачев и др., 2009; Украинский, Украинский, 2017 и др.), а также данные собственных многолетних наблюдений.

С сожалением приходится констатировать, что ни во времена Советского Союза, ни в постсоветское время на территории Казахстана, в отличие от СЗП, не проводилось регулярных долговременных мониторинговых наблюдений за популяциями сайгака. Имеющиеся в открытых источниках данные обрывочны и отражают состояние трех казахстанских популяций в разные временные периоды с 1949 по 2019 гг. Для проведения сравнительного анализа этот временной отрезок был поделен на два интервала – годы с высокой численностью сайгака (до 1997 г.) и годы депрессии численности – с 1998 г., как это было сделано при изучении состояния популяции сайгака СЗП (Каримова и др., 2020).

В качестве биологических параметров были выбраны такие, как плодовитость и яловость самок, соотношение полов новорожденных, приплод и половозрастной состав популяции, определяемые в июле-августе. Для расчета этих показателей использовались методики, описанные ранее (Каримова и др., 2020).

Изучение этологической структуры, в частности популяции сайгака СЗП, осуществлялось круглогодично во время полевых исследований путем визуальных наблюдений с фиксацией размера встреченных стад.

Все статистические расчеты проводились в программе Statistica 8.0.

Результаты и обсуждение

Численность. Численность сайгака существенно менялась на протяжении изучаемого периода (рис. 1). В СЗП максимальная численность сайгака (около 600-800 тыс. особей) была описана для 50-х гг. прошлого века, а для Казахстана самыми многочисленными (около 1.2 млн. голов были) были 1970-е гг. (Сайгак …, 1998).

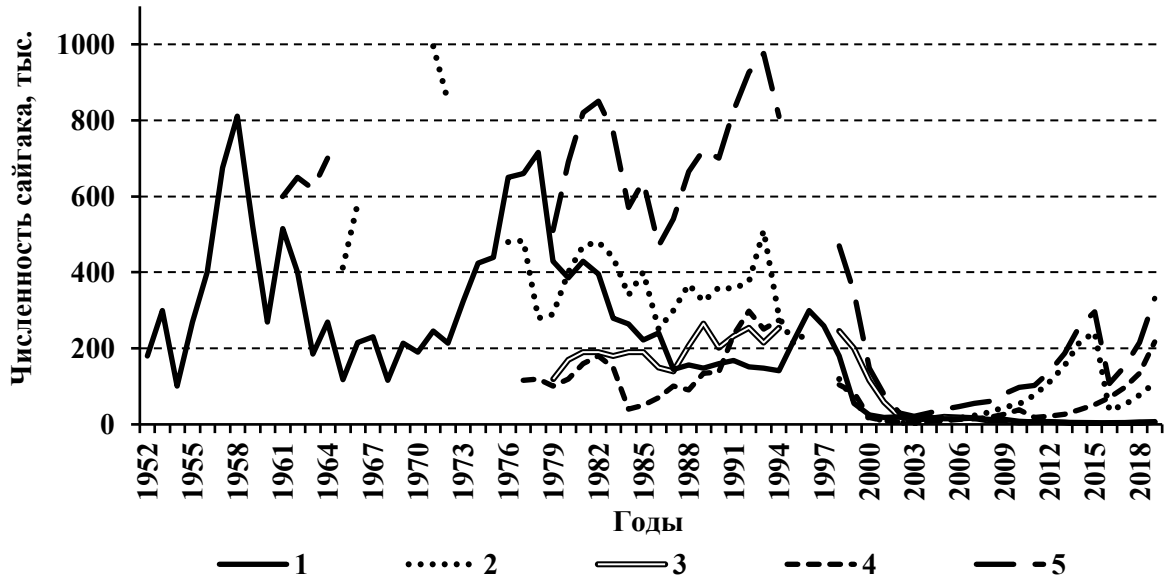

Рис. 1. Динамика численности популяций сайгака: Северо-Западного Прикаспия (1), Бетпакдалинской (2), Устюртской (3), Волго-Уральской (4) и для территории Казахстана в целом (5).

Основными факторами, приводящими к изменению численности в популяциях сайгака, считаются: 1) климатические (суровые зимы, дзуд [бескормица в зимний период в результате образования ледяной корки на поверхности снега] и засухи в вегетационный период); 2) биотические (болезни, паразиты и хищники); 3) антропогенные (прямые – промысел и браконьерство, и косвенные – сокращение и фрагментация мест обитания, возникающие вследствие интенсификации сельского хозяйства; уменьшение кормовой емкости пастбищ; строительство преград в виде каналов, дорог, заборов на полях и пастбищах на путях кочевок и сезонных миграций).

Сайгак, как вид, в ходе эволюции выработал высоко адаптированную экологическую стратегию (подвижность, стадность, высокая плодовитость, полигамия и т.д.), направленную на нейтрализацию последствий влияния неблагоприятных абиотических и биотических факторов (Жирнов, 1982). В таблице 1 приведены сведения о наиболее массовых случаях гибели сайгаков, произошедших в результате природных катастрофических событий за последние 70 лет.

Таблица 1. Случаи массовой гибели сайгаков, произошедшие в результате воздействия наиболее значимых абиотических и биотических факторов в 1950-2020 гг. (по: Сайгак …, 1998; Близнюк, 2009; Обзорный …, 2015; Нурушев, Байтанаев, 2017 с добавлениями).

Годы	Дзуд*		Ящур		Пастереллез	
	СЗП	Казахстан **	СЗП	Казахстан	СЗП	Казахстан
1950	+***	+	-	-	-	-
1951	-****	+	-	-	-	-
1952	-	+	-	-	-	-
1954	150000	-	-	-	-	-
1955	-	-	-	+	-	-
1956	+	-	-	+	-	-
1957	-	-	40000	-	-	-
1958	-	-	+	+	-	-
1967	-	-	-	50000 (БД)	-	-
1968	+	-	-	-	-	-
1969	-	-	-	+	-	-
1972	+	40000 (БД)	+	-	-	-
1973	-	+ (ВУ)	-	-	-	-
1974	-	-	-	+	-	-
1976	-	+ (БД)	-	-	-	-
1977	-	100000 (БД)	+	-	-	-
1981	-	-	-	-	-	70000-100000 (БД)
1984	-	+ (БД)	-	-	-	100000 (ВУ)
1985	+	+ (БД)	-	-	-	-
1987	+	-	-	-	-	-
1988	-	45000 (БД)	-	-	-	270000 (БД)
1994	-	120000 (БД)	-	-	-	-
1997	-	35000 (БД)	-	-	-	-
1999	+	-	-	-	-	-
2010	+	-	-	-	-	11920 (ВУ)
2011	-	-	-	-	-	441 (ВУ)
2012	-	-	-	-	-	1000 (БД)
2013	-	-	-	-	-	1500 (БД)
2015	-	-	-	-	-	211200 (БД)

Примечания к таблице 1: * – данные за декабрь предыдущего года и январь-март текущего, ** – для Казахстана в скобках указана популяция (ВУ – Волго-Уральская, БД – Бетпакдалинская), -*** – событие не отмечалось, +***** – событие отмечалось, но не приводило к массовой гибели сайгаков.

С 1950-х гг. случаев массовой гибели среди животных в У популяции не отмечалось, а в популяции сайгака СЗП – за последние 60 лет. Наиболее подверженной воздействию внешних факторов оказалась БД популяция, в которой численность неоднократно снижалась в два и более раз. Но даже после таких крупных потерь сайгак, обладающий высокой плодовитостью, оказался способным в течение нескольких лет восстанавливать свою численность (рис. 1).

Снижение численности популяций, происходящее при ухудшении условий обитания и за счет нарушения их демографической структуры (уменьшение доли размножающихся самок, а у полигамных видов, каким и является сайгак, и вследствие снижения доли взрослых самцов ниже критического уровня), может привести к уменьшению генетического разнообразия и возникновению эффекта «скрытого бутылочного горлышка». Утрата генетического разнообразия в значительной степени касается функционально значимых генов и генных комплексов, обусловливающих устойчивость животных к неблагоприятным факторам среды, в первую очередь, к резким климатическим изменениям и т.п. (Kholodova et al., 2006). Преодолеть это «горлышко» сайгакам, обитающим на территории Казахстана, видимо, оказалось проще, чем животным из популяции СЗП, т.к. в начале депрессии численности, согласно предварительным исследованиям (личное сообщение М.В. Холодова), уровень генетического разнообразия в популяции сайгака СЗП был несколько ниже, чем у копытных из БД и ВУ популяций, которые на протяжении предшествующих 50-ти лет неоднократно подвергались воздействию неблагоприятных факторов среды.

Официальный государственный промысел сайгаков на территории бывшего Советского Союза велся много лет и при соблюдении биологических норм изъятия (обычно не более 20% от предпромысловой (осенней) численности животных) не наносил вреда популяциям. Однако отмечались случаи чрезмерного промысла, например, в Казахстане в 1975-1977 гг., когда численность сайгаков достигла своего максимума и они стали наносить ущерб сельскохозяйственным культурам. Промысловые заготовки сайгаков в этот период составляли 35-39% от имеющегося поголовья, в результате чего численность животных к 1978-1979 гг. сократилась в 2-3 раза (Жирнов, 1982). В последующие годы случаев перепромысла допущено не было, а сокращение норм изъятия позволило к 1981 г. восстановить численность сайгака на территории Казахстана до уровня 1976 г. (рис. 1). На территории СЗП чрезмерный промысел сайгака в 1976-1980 гг. привел к сокращению популяции, и даже его закрытие в 1984 и 1987-1989 гг. не смогло исправить ситуацию, которая осложнилась начавшейся масштабной антропогенной трансформацией экосистем, в первую очередь на территории Калмыкии.

Всего на протяжении 40 лет (1951-1990 гг.) в Северо-Западном Прикаспии было добыто 2.24 млн. особей сайгаков, а в Казахстане (1955-1993 гг.) – 5.5 млн. (Сайгак …, 1998).

В 90-е годы прошлого века экономический кризис в странах СНГ вызвал неудержимый рост браконьерства. Из популяций целенаправленно изымались самцы, чьи рога и по сей день ценятся в традиционной китайской медицине, что повлекло за собой образование дисбаланса в половозрастной структуре популяций. Из-за нехватки половозрелых самцов численность всех популяций снизилась. В связи с этим постановлениями правительств как Республики Казахстан, так и субъектов Российской Федерации к началу 2000-х гг. были введены запреты любого охотничьего промысла или добычи сайгака, которые, периодически продлеваясь, действуют до настоящего времени.

Несмотря на то, что и в России (в 2013 г.), и в Казахстане (в 2018 г.) произошло ужесточение статей Уголовного кодекса, касающихся охоты на сайгака и обращения с их дериватами, отдельные случаи браконьерства все еще продолжают отмечаться.

Особенно эффективно борьба с браконьерством ведется в Казахстане (табл. 2), что, несомненно, приносит свои плоды – численность популяций ВУ и БД растет в последние годы, несмотря на случившиеся в 2010-2015 гг. эпизоотии пастереллеза на территории их обитания (табл. 1).

Как отмечалось выше, в результате проведения многолетнего промысла было выяснено, что изъятие из популяции до 20% особей не наносит значительного ущерба ее существованию (Жирнов, 1982). Большое число выявляемых случаев браконьерства в ВУ и БД популяциях в последние годы не может быть сопоставимо с масштабами государственных заготовок XX века. Хотя, по мнению казахстанских ученых, резкое падение численности трансграничной с Узбекистаном Устюртской популяции до 1300 особей в 2015 г. и слабый ее прирост в последующие годы вызвано именно браконьерской охотой (Отчет …, 2015; Байдавлетов и др., 2018).

В период 2010-2019 гг. на территории Республики Калмыкия выявлены всего 22 случая незаконной охоты на сайгака, послужившие основанием для возбуждения нескольких уголовных дел (Калмыцкая …, 2016; Богун, 2019). Но исследование, проведенное в 2018 г. (Филиппова, 2018), показало, что на территории СЗП ведется нелегальная торговля рогами сайгака, а авторы лично видели в 2014 г. в степи три головы сайгаков с отпиленными рогами (Каримова, Лущекина, 2018).

Пространственная структура популяций. Параллельно с изменением численности изменяется и площадь ареала сайгака (Сайгак …, 1998; Грачев, Бекенов, 2006; Близнюк, 2009; Грачев и др., 2009; Салихов, 2016).

Таблица 2. Факты незаконной охоты на сайгаков в Казахстане в 2007-2020 гг. (по: Мигушин, Горских, 2018; Портнягина, 2020 с добавлениями)

Показатели	Количественные показатели незаконной охоты на сайгака													
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Выявлено фактов	12	12	15	38	32	46	57	79	27	50	58	43	26	34
Изъято рогов	57	127	129	1822	95	5487	423	1174	2138	1419	1174	328	733	2500

Наибольшие изменения произошли на территории, где обитает популяция сайгака СЗП (рис. 2). С 50-х годов прошлого века площадь ареала этой популяции сократилась более чем в 50 раз, и сайгак перестал совершать сезонные миграции (табл. 3), периодически кочуя на незначительные расстояния в поисках корма. В популяциях сайгака, обитающих на территории Казахстана, эти изменения были не столь велики: здесь ареал сокращался от 2.4 раз (ВУ) до 5 раз (У), при этом массовость и протяженность миграций снизились всего в 1.5-2.5 раза.

В настоящее время в связи с ростом численности наблюдается постепенное расширение ареалов Волго-Уральской и Бетпакдалинской популяций сайгака.

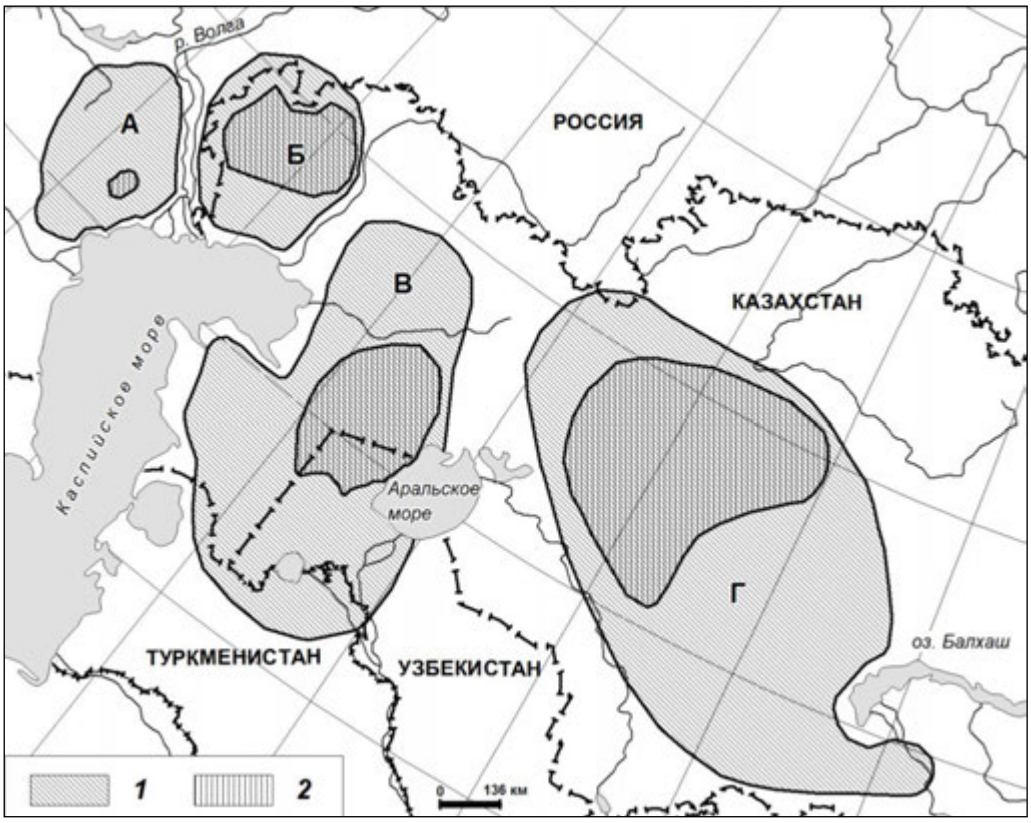

Рис. 2. Ареал популяций сайгака: Северо-Западного Прикаспия (А), Волго-Уральской (Б), Устюртской (В), Бетпакдалинской (Г) при высокой численности до 1997 г. (1) и низкой – после 1998 г. (2).

Этологическая структура. Для сайгака, обитателя открытых ландшафтов, свойственна групповая организация, при которой характерно образование в разные сезоны года стад различной величины и состава, а также более крупных социальных группировок – скоплений (Сайгак …, 1998). Высокая стадность обеспечивает безопасность, в первую очередь отдельным животным, при нападении хищников, а также способствует быстрому перемещению большого количества особей на далекие расстояния, что крайне важно при засухах или выпадении большого количества снега в пределах постоянной области обитания этих копытных.

При этом стадность коррелирует с общей численностью животных. Если в Казахстане в 70-е гг. XX в. при высоком уровне численности в апреле мелкие стада (численностью до 50 особей) составляли 35%, средние (51-500 особей) – 30% и крупные (более 500 особей) – 35% (Фадеев, Слудский, 1982), то при низком уровне численности во время авиаучетов, проводимых в апреле 2005-2008 гг., мелкие стада составляли 83.4-100% встреч, средние – 0-16.6%, крупные – 0-0.6% (Грачев и др., 2009).

Таблица 3. Площадь ареала и длина миграционных путей разных популяций сайгака (по: Близнюк, 2009; Грачев и др., 2009 с добавлениями).

Популяции	Годы максимальной численности		Годы минимальной численности	
	Площадь ареала, тыс. км^2 (годы)	Миграционный путь, км	Площадь ареала, тыс. км^2 (годы)	Миграционный путь, км
Северо-Западного Прикаспия	100-120 (1956-1960)	420	2-3 (2010-наст. время)	Нет миграций
Волго-Уральская	138 (1972-1993)	470	57 (2000-2005)	150-200
Устюртская	435 (1972-1993)	1140	87 (2010-наст. время)	400-500
Бетпакдалинская	758 (1972-1993)	800	226 (2000-2005)	400-600

В СЗП в годы высокой численности в апреле наблюдалась похожая картина – мелкие стада сайгака составляли 35.6%, средние – 37.5%, крупные – 26.9% (Сайгак …, 1998). А в 2014-2020 гг. – в годы низкой численности – на мелкие стада приходилось 56.1%, средние – 29.8%, крупные – 14.1%. Такие достаточно высокие, по сравнению с Казахстаном, показатели встреч средних и больших по размеру стад можно объяснить тем, что в последние 10 лет сайгак обитает на небольшой площади, преимущественно в пределах ООПТ экорегиона Черные Земли. Следует отметить, что на этой территории мониторинговые работы ведутся постоянно, и формирующиеся в апреле отельные скопления фиксируются по несколько раз, что увеличивает их долю при определении стадности. В Казахстане же исследования, как правило, проводились при авиаучетах на достаточно большой территории, что не позволяло регистрировать одно и то же стадо несколько раз.

Сравнительный анализ данных, имеющихся для периодов высокой и низкой численности, показал, что количество сайгаков в скоплениях на местах отела уменьшилось пропорционально общей численности копытных – от десятков и сотен тысяч особей в 60-90-х годах прошлого века (Фадеев, Слудский, 1982; Сайгак …, 1998) до 1-5 тыс. животных в Казахстане в 2004-2008 гг. (Грачев и др., 2009) и в 2014-2016 гг. в СЗП (Каримова, Лущекина, 2018).

Плодовитость и структура популяции. Для сравнения плодовитости самок и половозрастной структуры всех популяций было использовано два временных интервала (1986-1995 и 2004-2009 гг.), для которых имелся достаточный для анализ объем данных, отражающих состояние популяций перед началом снижения численности и на период ее депрессии.

В 1986-1995 гг. в популяции СЗП регистрировалось больше взрослых самцов (15.7±5.7%), чем в казахстанских популяциях (13.9±6.6%), но эти различия статистически не значимы (Mann-Whitney $U_{(9.22)}$=80.5, P=0.42). По данным Л.В. Жирнова (1982), в отдельные годы при промысле из популяций выборочно изымались самцы (их доля среди добываемых животных достигала 37% в СЗП и 50-60% в Казахстане), что могло привести к изменениям в половозрастной структуре казахстанских популяций. Также на снижение средней доли самцов, несомненно, повлиял дзуд, отмеченный зимой 1984, 1985 и 1988 гг., когда погибла часть сайгаков БД популяции и, в первую очередь, это

ослабленные после гона взрослые самцы, которые особенно подвержены воздействию неблагоприятных факторов (Сайгак …, 1998). И это подтверждается самой низкой долей самцов в БД популяции в анализируемый период – 11.3±7.8%. Большее количество взрослых самцов, характерное для популяции сайгаков СЗП в те годы, не повлияло на общую плодовитость самок, которая была статистически значимо ниже (1.18±0.23[2] экз.), чем в казахстанских популяциях – 1.47±0.19 экз. (Mann-Whitney $U_{(5.15)}$=12.0, P=0.03). Вероятно, это было связано с уменьшением количества и качества кормов, вызванного сокращением местообитаний в СЗП в эти годы из-за интенсивного развития сельского хозяйства с его животноводческим компонентом. Однако, несмотря на это, численность популяции все еще оставалась достаточно высокой (140-240 тыс. голов). Доля яловых самок в популяции СЗП была несколько выше (10.2±6.1%), чем среди самок в казахстанских популяциях – 9.5±6.3%, но эти различия статистически не значимы (Mann-Whitney $U_{(5.15)}$=32.5, P=0.66). Доля же самцов среди новорожденных сайгачат, наоборот, в СЗП была статистически значимо ниже, чем в популяциях на территории Казахстана – 48.5±2.2% и 51.8±3.7%, соответственно (Mann-Whitney $U_{(6.11)}$=11.5, P=0.03). В этот период приплод популяций (выход молодняка на 1 самку – стандартный показатель для июля-августа) был выше в СЗП (0.79±0.17 экз.), чем в трех казахстанских популяциях – 0.67±0.25 экз., но эти различия статистически не значимы (Mann-Whitney $U_{(9.22)}$=60.0, P=0.15). Это можно объяснить более низкой смертностью молодняка, отмечаемой в первые четыре месяца в СЗП – 38.7±16.3%, против 52.1±4.0% в ВУ, 52.7±17.7% в БД и 67.0±10.7% в У популяциях.

Период 2004-2009 гг. во всех популяциях характеризуется снижением практически всех важных для размножения показателей, причем для казахстанских популяций оно статистически значимо. Общая плодовитость самок в СЗП снизилась до 0.82±0.39 экз. (Mann-Whitney $U_{(5.5)}$=5.0, P=0.12), а в Казахстане до 0.85±0.31 экз. (Mann-Whitney $U_{(15.6)}$=0.5, P=0.00). На 1 самку в июле-августе в СЗП приходилось 0.81±0.18 сайгачонка, что даже выше чем в 1986-1995 гг. (Mann-Whitney $U_{(9.5)}$=22.0, P=0.95), а в Казахстане всего 0.48±0.40 (Mann-Whitney $U_{(22.7)}$=37.0, P=0.04). Доля взрослых самцов в популяции СЗП снизилась до 11.5±1.9% (Mann-Whitney $U_{(9.5)}$=10.0, P=0.09), а в Казахстане до 8.7±3.8% (Mann-Whitney $U_{(22.15)}$=85.0, P=0.01). На основе проведенного статистического анализа можно сделать вывод, что состояние популяции сайгака СЗП в 2004-2009 гг., характеризующееся, как минимум, такими показателями, как приплод и доля взрослых самцов, было несколько лучше, чем в казахстанских популяциях, в целом, хотя эти различия статистически и не значимы. В наихудшем положении находилась Устюртская популяция, где доля взрослых самцов составляла всего 4.9±1.7%, а общая плодовитость самок – 0.57±0.02 экз.

Исходя из того, что основные биологические параметры анализируемых популяций в начале 2000-х годов были сопоставимы, причину, в результате которой их численность на настоящий момент значительно отличается, следует, видимо, искать среди внешних факторов. Ранее мы пришли к выводу, что к снижению численности сайгака в популяции СЗП привела нехватка половозрелых самцов, сохранявшаяся на протяжении достаточно продолжительного времени (Каримова и др., 2020). Также, на территории Северо-Западного Прикаспия для изолированной популяции сайгака утрата и сокращение пригодных местообитаний, видимо, играют не последнюю роль. Так, согласно данным за 2019 г., в Республике Калмыкия, где в свое время обитала основная часть популяции сайгака СЗП, на долю сельскохозяйственных земель приходится 84.5% территории (Калмыкия в цифрах, 2020), из которых пастбища занимают 77.4%, а пастбищная нагрузка составляет 55.6 голов на 1 км^2 (из них 46.5 голов приходятся на овец и коз – основных конкурентов сайгака за ресурсы). В Казахстане же пастбищная нагрузка тоже высокая – 74.7 голов на 1 км^2 (из них 48.2 – мелкий рогатый скот; В Казахстане …, 2020). Но с учетом огромных казахстанских пространств, где обитает сайгак, и того, что сельскохозяйственные земли занимают только 40.1% территории (Тажибаева, 2019), а на долю пастбищ из них приходится 43.9%, многочисленные стада сайгаков могут легче найти себе пропитание и имеют возможность для совершения протяженных миграций.

Как отмечалось выше, численность трансграничной (Казахстан–Узбекистан) Устюртской популяции остается на крайне низком уровне, в первую очередь из-за браконьерской охоты, а также

[2] Общая плодовитость самок оценивается в количестве рожденных детенышей на каждую самку из всей популяции (прим. авт.).

из-за наличия препятствий на путях миграций.

Несмотря на то, что доля самцов в ВУ и БД популяциях была и остается низкой на протяжении остаточно длительного времени – в 2004-2009 гг. (12.9±2.9% и 9.1±2.1%, соответственно), а в 2017 г. – 11.7-14.2% в ВУ и 5.3-9.2% в БД (Байдавлетов и др., 2018), численность этих популяций значительно увеличилась. Это произошло не только из-за высокой плодовитости сайгаков, но и благодаря вмешательству человека. В Казахстане в деле возрождения сайгака активно участвует не только государство (принятие ряда законодательных актов, значительное и стабильное финансирование, создание новых особо охраняемых территорий в местах обитания сайгака, усиление охранных мероприятий, в т.ч. организация специальных мобильных групп по охране сайгака и других редких видов животных, позволивших значительно снизить пресс браконьерства), но и ряд международных фондов и организаций. Просветительская работа среди населения, включающая в себя образовательные мероприятия и широкомасштабные природоохранные акции, разработку и распространение различных иллюстрированных материалов, таких как плакаты и листовки, изготовление и демонстрация фильмов, также принесла свои положительные результаты (Украинский и др., 2019).

Выводы

Выработанные в ходе эволюции жизненные стратегии сайгака (раннее вступление в размножение и высокая плодовитость самок, полигамия, стадность, миграции и др.) позволили виду сохраниться со времен мамонтовой фауны в изменяющихся условиях среды. После снижения численности, вызванной естественными причинами – суровые зимы, дзуд, засухи, болезни и хищники, эти копытные достаточно быстро ее восстанавливают. Но к влиянию человека (интенсивное развитие сельского хозяйства, промысел, браконьерство и т.д.) сайгаки адаптироваться так и не смогли.

1. В конце XX в. экономическая обстановка в странах, на территории которых обитал сайгак, привела к росту браконьерства среди населения, что послужило причиной резкого сокращения общей численности этих копытных с 1.2 млн. особей до 50 тыс. Площадь основного обитания сократилась – в 50 раз для популяции сайгаков СЗП, в 2.4-5 раз для казахстанских популяций. Протяженность и массовость сезонных миграций сократились, а популяция СЗП перешла практически к оседлому образу жизни.
2. В период низкой численности для всех популяций отмечено уменьшение количества стад разной численности, встречаемых на протяжении всего года, а стада численностью до 50 голов отмечены в 56-100% случаев.
3. В начале 2000-х гг. основные биологические параметры, характеризующие четыре популяции сайгака, были сопоставимы, причем доля взрослых самцов и выход молодняка на 1 самку в июле-августе в популяции СЗП были выше, чем в казахстанских популяциях (11.5±1.9% и 0.81±0.18 экз. против 8.7±3.8% и 0.48±0.40 экз. соответственно).
4. Рост численности БД и ВУ популяций стал возможен благодаря организации эффективной охраны при поддержке государственных органов и международных фондов и ведению просветительской работы среди населения, что позволило значительно снизить пресс браконьерства.

При действенной охране, как это показано на примере БД и ВУ популяций, сайгак способен восстановить свою численность за достаточно непродолжительный период, хотя максимум, отмеченный в 70-80-хх гг. прошлого века (когда общая численность составляла около 1.2 млн. голов), вряд ли будет достигнут. Это связано с утратой местообитаний, особенно характерной для территории СЗП, где обитает изолированная популяция сайгака.

Следует отметить, что сохранение популяции сайгака СЗП и восстановление ее численности в настоящее время зависит в большей степени от тех мер, которые будут предприняты на разных уровнях. Кроме организации эффективной охраны и полномасштабного мониторинга, это и недопущение фрагментации мест обитания сайгака за счет снятия разного рода препятствий для кочевок, улучшение качества местообитаний, создание новых охраняемых территорий разного уровня в наиболее подходящих местообитаниях и объединение их путем создания экологических коридоров в единую сеть, расширение и активизация эколого-просветительской деятельности. Такой комплекс мероприятий должен, в конечном итоге, принести свои плоды.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам заказника «Степной» и его директору В.Г. Калмыкову, оказавшим большую помощь в сборе материала для данного

исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Банников А.Г., Жирнов Л.В., Лебедева Л.С., Фандеев А.А. 1961. Биология сайгака. М.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, журналов и плакатов. 336 с.

Байдавлетов Е.Р., Грачев А.А., Кантарбаев С.С., Сапарбаев С.К., Байдавлетов Р.Ж., Бекманов Н.М., Грачев Ю.А. 2018. Учет и мониторинг сайгаков в Казахстане в 2017 г. // Saiga News. Выпуск 23. С. 19-23.

Близнюк А.И. 2009. Сайгак калмыцкой популяции. Элиста: ЗАОр «НПП «Джангар». 554 с.

Богун С.А. 2019. Состояние популяции сайгака в заповеднике «Черные земли»: проблемы и перспективы ее сохранения // Научные труды Национального парка «Хвалынский». Сборник научных статей VI Международной научно-практической конференции «Особо охраняемые природные территории: прошлое, настоящее, будущее». Хвалынск, 17-18 октября 2019 г. Саратов: Амирит. С. 7-14.

В Казахстане увеличилось поголовье скота. 2020 [Электронный ресурс https://forbes.kz/news/2020/06/12/newsid_227295 (дата обращения 15.10.2020)].

Все о сайгаке – призраке степи. 2020 [Электронный ресурс https://wwf.ru/species/saygak-prikaspiyskiy/saiga/ (дата обращения 15.10.2020)].

Габунщина Э.Б. 2010. Особенности развития сельского хозяйства Республики Калмыкия в переходный период // Вестник Калмыцкого института гуманитарных исследований РАН. № 2. С. 90-95.

Грачев Ю.А., Бекенов А.Б. 2006. Состояние популяций и перспективы сохранения сайгака в Казахстане // Степной бюллетень. № 21-22. С. 15-17.

Грачев Ю.А., Мелдебеков А.М., Бекенов А.Б. 2009. Численность, структура и воспроизводство популяций сайгака в Казахстане // Степной бюллетень. № 27. С. 47-50.

Жирнов Л.В. 1982. Возвращенные к жизни (экология, охрана и использование сайгаков). М.: Лесная промышленность. 224 с.

Калмыкия в цифрах. 2020 [Электронный ресурс https://astrastat.gks.ru/storage/mediabank/Калмыкия в цифрах_2020.pdf (дата обращения 3.11.2020)].

Калмыцкая правда. 2016. Если останется последний сайгак, в этом будем виноваты мы все [Электронный ресурс http://halmgynn.ru/4494-esli-ostanetsya-posledniy-saygak-v-etom-budem-vinovaty-my-vse.html (дата обращения 15.10.2020)].

Каримова Т.Ю., Лущекина А.А. 2018. Особенности пространственного размещения и этологической структуры популяции сайгака на территории заказника «Степной» (Астраханская область) // Экосистемы: экология и динамика. Т. 2. № 1. С. 73-91 [Электронный ресурс http://www.ecosystemsdynamic.ru (дата обращения 15.10.2020)].

Каримова Т.Ю., Лущекина А.А., Неронов В.М., Пюрвенова Н.Ю., Арылов Ю.Н. 2020. Биологические особенности популяции сайгака Северо-Западного Прикаспия в периоды разной численности // Аридные экосистемы. Т. 26. № 4 (85). С. 51-58. [*Karimova T.Yu., Lushchekina A.A., Neronov V.M., Pyurvenova N.Yu., Arylov Yu.N.* 2020. Biological Features of the Northwest Pre-Caspian Saiga Population at Different Sizes // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 4. P. 298-304.]

Кириков С.В. 1966. Промысловые животные, природная среда, человек. М.: Наука. 348 с.

Мигушин А.А., Горских В.Г. 2018. Состояние популяции сайгаков в Казахстане // Проблемы биологии, зоотехнии и биотехнологии: сборник трудов научно-практической конференции научного общества студентов и аспирантов биолого-технологического факультета Новосибирского ГАУ, Новосибирск, 18 декабря 2017 г. С. 42-45.

Нурушев М.Ж., Байтанаев О.А. 2018. Проблемы и методы спасения сайгака (*Saiga tatarica* L.) в Казахстане // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. № 1. С. 1-19 [Электронный ресурс http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2018-1/Articles/ZNM-2018-1.pdf (дата обращения 15.10.2020)].

Обзорный отчет. 2015 [Электронный ресурс https://www.cms.int/sites/default/files/document/Saiga MOS3_Overview_Report_of_Conservation_Status_Rus.pdf (дата обращения 3.11.2020)].

Отчет по итогам основной деятельности РОО «Казахстанская ассоциация сохранения биоразнообразия» за 2011-2015 гг. 2015 [Электронный ресурс https://www.cms.int/sites/default/files/document/Отчет АСБК 2011-2015_R.pdf (дата обращения 3.11.2020)].

Портнягина Н. 2020. Пришла сайга… столоваться [Электронный ресурс https://www.kazpravda.kz/articles/view/prishla-saiga-stolovatsya (дата обращения 3.11.2020)].

Сайгак: филогения, систематика, экология, охрана и использование. 1998 / Ред. В.Е. Соколов, Л.В. Жирнов. М.: Типография Россельхозакадемии. 356 с.

Салихов Т.К. 2016. Современное состояние уральской популяции сайгаков на территории проектируемого государственного природного резервата «Бокейорда» Западно-Казахстанской области // Гидрометеорология и экология. № 4. С. 147-156.

Тажибаева Ж.О. 2019. Повышение эффективности управления земельными ресурсами республики Казахстан // София. № 2. С. 57-63.

Украинский В.В., Украинский Е.В. 2017. Некоторые данные, полученные в результате мониторинга Бетпакдалинской популяции сайгака до массового падежа 2015 года // Биологическое разнообразие азиатских степей. Материалы III Международной научной конференции (24-27 апреля 2017 г., Костанай, Казахстан). Костанай. С. 127-132.

Украинский В.В., Украинский Е.В., Переладова О.Б. 2019. Методика мониторинга сайгака для поддержки сохранения вида: пример бетпакдалинской популяции // Степной бюллетень. № 51-52. С. 58-63.

Фадеев В.А., Слудский А.А. 1982. Сайгак в Казахстане (Экология, хозяйственное значение). Алма-Ата: Наука Казахской ССР. 160 с.

Филиппова А. 2018. Отчет по исследованию нелегального рынка дериватов сайгака на территории РФ. Международный фонд защиты животных IFAW. М. 13 с.

Экономика Казахской ССР. 2020 [Электронный ресурс https://ru.wikipedia.org/wiki/Экономика_Казахской_ССР (дата обращения 3.11.2020)].

Frank D.A., McNaughton S.J., Tracy B.F. 1998. The Ecology of the Earth's Grazing Ecosystems Profound functional similarities exist between the Serengeti and Yellowstone // BioScience. Vol. 48. No. 7. P. 513-521.

Harris G., Thirgood S., Hopcraft J.G.C., Cromsigt J.P.G.M., Berger J. 2009. Global decline in aggregated migrations of large terrestrial mammals // Endangered species research. Vol. 7. P. 55-76.

Kholodova M.V., Milner-Gulland E.J., Easton A.J., Amgalan L., Arylov Iu.A., Bekenov A., Grachev Iu.A., Lushchekina A.A., Ryder O. 2006. Mitochondrial DNA variation and population structure of the Critically Endangered saiga antelope *Saiga tatarica* // Oryx. Vol. 40. No. 1. P. 1-2.

Morrison J.C., Sechrest W., Dinerstein E., Wilcove D.S., Lamoreux J.F. 2007. Persistence of Large Mammal Faunas as Indicators of Global Human Impacts // Journal of Mammalogy. Vol. 88. No. 6. P. 1363-1380.

The IUCN Red List of Threatened Species. 2007 [Электронный ресурс https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/species_extinction_05_2007.pdf (дата обращения 3.11.2020)].

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 68-81

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 581.5

ЦИФРОВАЯ ФИТОИНДИКАЦИЯ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ В СУХОЙ СТЕПИ (РЕСПУБЛИКА КАЛМЫКИЯ)[1]

© 2021 г. К.О. Прокопьева*, **, М.В. Конюшкова*, **, Н.М. Новикова*, И.В. Соболев***

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12. E-mail: christina.prokopyeva@gmail.com
***Почвенный институт им. В.В. Докучаева*
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2. E-mail: mkon@inbox.ru
****Институт водных проблем РАН*
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: nmnovikova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.10.2020. После доработки 02.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020

На территории ландшафтного района Северной Сарпинской низменной равнины Прикаспийской низменности в зоне светло-каштановых почв проведены почвенно-геоботанические исследования, которые позволили оценить диапазон варьирования почвенного засоления, характерного для видов растений и растительных сообществ сухой степи Республики Калмыкия, и рассчитать цифровые модели для индикации степени засоления почв по геоботаническим данным. Вдоль 64-метровой трансекты на каждом метре закладывались геоботанические площадки, почвенные прикопки и скважины глубиной до 2-х метров. В почвенных пробах измеряли такой показатель засоления как pNa в водной суспензии (1:5). В результате удалось выявить величину засоления для каждого из 12 видов растений и 7 растительных сообществ, встреченных на трансекте, на глубине 0-30, 0-50, 0-100 см. Это, в свою очередь, позволило выделить группы видов растений по отношению к степени засоления. Первая группа включает виды, приуроченные к незасоленным почвам с узким диапазоном значений содержания солей. Вторая группа имеет широкий диапазон в отношении засоления и предпочтение к незасоленным почвам. К третьей группе относятся солелюбивые виды (галофиты), приуроченные к засоленным и сильно засоленным почвам. Из встреченных 7 растительных сообществ два (*Stipa lessingiana+Festuca valesiaca+Artemisia lerchiana* и *S. lessingiana+F. valesiaca+Tanacetum achilleifolium*) распространены на незасоленных до глубины 2 м почвах; два других (*F. valesiaca+A. lerchiana+T. achilleifolium* и *A. lerchiana+T. achilleifolium+Artemisia pauciflora*) тяготеют к незасоленным почвам в пределах 0-50 см, и три (*Kochia prostrata+A. pauciflora*, *A. pauciflora* и *Poa bulbosa+Anabasis aphylla*) встречаются только на засоленных с глубины 25-50 см почвах. На основе данных о присутствии видов растений в качестве предикторов с помощью метода CART (дерево решений) была предсказана степень засоления почв с точностью 80% для слоя 0-30 см, 81% – для слоя 0-50 см и 64% – для слоя 0-100 см. Значимыми растениями-предикторами (ранг>60) оказались *K. prostrata, T. achilleifolium, Artemisia austriaca, F. valesiaca*. Остальные виды имеют низкие значения важности (верности) в качестве предикторов.

Ключевые слова: засоление почв, фитоиндикация, виды растений и сообществ, индикаторы глубины и степени засоления, значимость, достоверность, алгоритмы CART и Random forest, машинное обучение, модели связи, точность индикации.
DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10152

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №17-55-560006 «Почвенный покров морских равнин Прикаспийского региона: первичная дифференциация и эволюция» и по разделу 2.6. «Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях» темы НИР ИВП РАН «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» (№ 0147-2018-0002), № госрегистрации АААА-А18-118022090104-8.

Фитоиндикация – метод, использующий информацию о растительности (видах и сообществах) в качестве показателя (индикатора) состояния исследуемых компонентов среды. Этот метод активно используется при почвенных исследованиях, в частности при оценке засоления, за счет наличия тесной связи между характеристиками растений и свойствами почв (Виноградов, 1964), поскольку засоление почв – лимитирующий экологический фактор произрастания растений, особенно в засушливых условиях аридных и субаридных районов.

Растительные индикаторы засоленных почв были выявлены многими исследователями, как в России и бывшем СССР, так и за рубежом: в Зайсанской котловине (Келлер, 1912), в Целиноградской области (Тумин, 1910), на юге Европейской части бывшего СССР (Раменский, 1938, 1950), в Большой Соленой пустыне в США (Fireman, Hayward, 1952), в Австралии (Prescott, 1931; Skerman, 1948). В зоне каштановых почв (зональных почв сухих степей) фитоиндикационные исследования проводились Н.А. Димо и Б.А. Келлером (1907), И.В. Лариным (1926, 1929), Ф.Я. Левиной (1954), П.П. Жудовой (1955), С.В. Викторовым с соавторами (1962). Б.В. Виноградов (1964) при составлении списка индикаторов засоления почв использовал определение среднего значения засоления корнеобитаемого слоя почвы основных растений в границах ландшафта географического района. При сопоставлении приуроченности растений к различным почвам были составлены ряды относительной солеустойчивости растений (Леонтьев, 1952). Л.Г. Раменский (1938, 1950) подобные ряды объединял в несколько ступеней солончаковатости, привязанные к определенным величинам засоления. При индикационной оценке по растительности в пределах ограниченного географического района Б.В. Федоров (1930) выделял индикаторы ступеней засоления по градациям содержания солей в почве.

На основе литературного обзора можно заключить, что развитие такого ботанического направления в индикации засоления почв – галоиндикации, пришлось на первую половину XX века, с перерывами в периоды войн и революций, в то время как аграрная политика государства придавала толчок фитоиндикационным исследованиям, например, переселенческая политика и аграрная реформа П.А. Столыпина в России и развитие мелиорации, и выращивание хлопка в бывшем СССР.

Индикационная школа СССР, которую основали и возглавили ученые С.В. Викторов, Е.А. Востокова и Д.Д. Вышивкин, была широко известна в странах социалистического лагеря, а монография «Введение в индикационную геоботанику» (Викторов и др., 1962) была переведена более чем на 15 языков. Были составлены справочники индикационного значения видов разных территорий аридных районов бывшего СССР. В ходе развития этого направления фитоиндикация эволюционировала в ландшафтную индикацию, увеличившую точность метода.

Базовый терминологический аппарат индикационного метода, развивавшегося в СССР, включал несколько основных понятий: объект индикации – условия среды (в нашем случае – количественное значение засоления и его глубина); индикатор – показатель объекта индикации или его характеристик; индикация – процесс практической реализации индикационного метода.

Индикация включает два этапа работ: на первом ведется поиск индикатора и выявление его верности и значимости, а далее, на втором этапе – собственно индикация – практические работы по определению пространственного расположения (распространения) индиката. Результаты индикационных исследований часто представляются в виде картографических материалов, при составлении которых ранее использовались материалы аэрофотосъемки, а в настоящее время – материалы дистанционного зондирования Земли из космоса.

Возможность использования того или иного вида растения или растительного сообщества в качестве показателя условий среды определяется при условии: 1 – широкой представленности – присутствия на участках территории, где распространен индицируемый объект (индикат); 2 – высоких значений совместных встреч индикатора и индиката.

В настоящее время в результате развития цифровых компьютерных технологий в индикационных исследованиях важное место приобретают методы обработки данных с применением компьютерных прикладных программ, позволяющих получать количественные характеристики индикационных связей для оценки их значимости. Примером могут служить фитоиндикационные исследования, проведенные на засоленных почвах центральной Польши. Исследование показало, что только три (*Salicornia europaea* [2], *Glaux maritima* и *Triglochin maritimum*) из 14 анализируемых видов

[2] Латинские названия растений приведены по работе С.К. Черепанова (1995).

галофильных растений являются индикаторами засоления, которое было оценено по электропроводности (ECe; Piernik, 2003). Индикационная роль растительных сообществ оказалась намного выше, чем отдельных видов растений, при этом при сравнении разных слоев почв более информативным оказался слой 0-25 см по сравнению со слоем 0-5 см. Основными факторами, помимо засоления, влияющими на распределение галофильных сообществ, оказались: влажность почв, содержание SO_4^{2-} и соотношение Ca^{2+}/Na^{+}. Были определены нижние пороги засоления (ECe) для галофильных сообществ с доминированием *Salicornia europaea* и *Tripolium pannonicum*. Они были встречены на экстремально засоленных почвах (засоленность более 20 дСм/м); сообщество с господством *Triglochin maritimum* – при засолении выше 12 дСм/м; сообщество *Puccinellia distans–S. europaea–Spergularia marina* – при засолении выше 8 дСм/м; сообщество *Glaux maritima–Potentilla anserina–Agrostis stolonifera* – при засолении выше 2 дСм/м. Близкие значения для *Tripolium pannonicum* были получены Н.А. Волковой (2005) на территории Ростовской области.

Использование отдельных видов в качестве индикатора имеет преимущество в том, что их пространственное распределение четко определено, но в тоже время, они могут иметь широкую толерантность (способность выживать долгое время после смены оптимальных условий на худшие). Преимущество использования в качестве индикаторов растительных сообществ заключается в том, что обычно они имеют более узкую толерантность, чем вид. Недостаток использования растительных сообществ в качестве индикатора заключается в том, что из-за увеличения антропогенного влияния сообщества теряют характерные виды и тем самым индикация затрудняется (Wierda et al., 1997).

В работе E.N. Bui и B.L. Henderson (2003) исследовалась возможность растений служить индикаторами засоления почв в Квинсленде (Австралия). Для исследования взаимосвязи между присутствием растения, климатическими и эдафическими факторами были использованы обобщенные аддитивные модели [3] и кластеризация. Результаты этих статистических подходов свидетельствуют о наличии взаимосвязи между засолением почв и акациевыми сообществами. Представлены аддитивные модели для прогнозирования почвенного засоления на основе использования переменных окружающей среды, включая данные о растительности.

Анализ данных, полученных в ходе детальных почвенно-геоботанических исследований с сопряженным анализом микрорельефа, растительности, почв и дистанционной информации в солонцовом природном комплексе (Новикова и др., 2017), выявил тесную связь между разновидностями почв и общим проективным покрытием сообществ (r=-0.71), разновидностями почв и растительными сообществами (r=0.72), и низкую последних с микрорельефом (r=0.42 и r=0.36, соответственно), а данные по укосам хорошо коррелируют со значениями вегетационного индекса NDVI. Запасы фитомассы, отраженные через вегетационный индекс, четко определяются эдафическими условиями, в первую очередь, почвенной разностью.

Под цифровой фитоиндикацией мы понимаем такой метод исследования, в котором материалы полевых геоботанических наблюдений переводятся в электронные таблицы или базы данных, в их обработке используются компьютерные программы, позволяющие получать количественные характеристики индиката и индикатора, а также проводить сопряженный статистический анализ с данными материалов космической съемки и другими цифровыми данными (цифровыми моделями рельефа, почвенными, геоморфологическими и климатическими данными и др.). Результатом цифровой фитоиндикации являются статистически обоснованные модели, карты и подобные продукты цифровой обработки данных.

Подводя итог проведенному ретроспективному рассмотрению примеров изучения индикационного значения видов и сообществ растений, приходим к выводу о том, что индикационная ценность видов и сообществ растений при определении засоления почвы высока, достаточно широко используется, но данные, показывающие приуроченность видов и сообществ к количественным значениям засоления и *верность* (тесноту связи между ними), очень слабо представлены в опубликованной литературе; методические подходы к получению данных не являются общепринятыми. В связи с этим цель настоящей работы – выявить с помощью современных методов цифрового анализа тесноту связи видов и растительных сообществ с глубиной и степенью засоления почв солонцового комплекса, и оценить возможность численного прогноза

[3] Это модели, в которые факторы входят в виде алгебраической суммы.

степени засоления почв в зависимости от присутствия тех или иных видов растений, характерных для территории Сарпинской низменной равнины.

Материалы и методы

Участок, где проводились исследования, располагается на целинной территории на правобережье Волги в пределах Северной Сарпинской низменной равнины Прикаспийской низменности (Доскач, 1979), в районе поселка Ики-Манлан Республики Калмыкия (в 11 км на юго-запад), координаты 47.965° с.ш., 45.551° в.д., абсолютная высота 8 м н.у.м. БС (рис. 1). Территория ключевого участка находится в зоне светло-каштановых почв, формирующих с солонцами комплексы, долевое участие последних составляет 25-50% и более (Хитров и др., 2003).

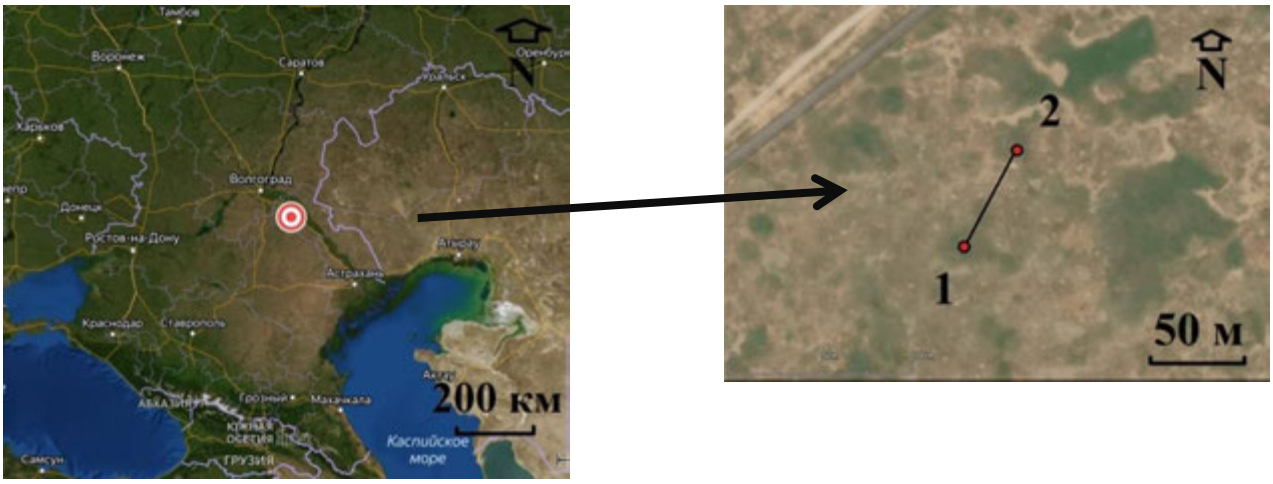

Рис. 1. Расположение ключевого участка и трансекты. Координаты начала трансекты (точка 1) – 47.96472° с.ш., 45.55139° в.д.; конца трансекты (точка 2) – 47.96524° с.ш., 45.55180° в.д.

Полевые работы выполнялись в сентябре 2010 года, апреле и сентябре 2011 года. В ходе полевых исследований из центра одной округлой западины (микропонижения) до центра другой была проложена трансекта длиной 64 м. На трансекте в пределах каждого метра (на площадке 0.5х0.5 м) были выполнены геоботанические описания. На каждом метре трансекты бурились скважины глубиной 1-2 м и были отобраны образцы со следующих глубин: 0-2, 2-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-70, 80-100, 100-120, 140-160, 180-200 см. В общей сложности количество образцов из скважин составило 551 почвенный образец. В образцах из скважин в трехкратной повторности было проведено измерение pNa с помощью стеклянного ионселективного электрода серии ЭКОМ-Na на приборе Экотест-2000. Измерение проводилось в водной суспензии 1:5. Величина pNa оценивается как отрицательный логарифм активности ионов натрия и является показателем засоления (Орлов, 1980).

Для наглядности распределения засоления на трансекте составлялся профиль засоления почвы на измеренную глубину до 2-х метров на основе метода обратных взвешенных расстояний в программе ArcMap. В исследованиях S. Karadağ с соавторами (2016) было показано, что определение содержания натрия в почвенных суспензиях (или экстрактах вытяжек) с помощью ионоселективных электродов хорошо соотносится с данными определения с помощью ионной хроматографии. Это позволяет с высокой долей надежности использовать градации по степени засоления, приведенные в таблице 1.

В соответствии с поставленной задачей выявления индикаторов не только степени засоления, но и глубины, обработка и анализ средневзвешенных значений велись по слоям 0-30, 0-50 и 0-100 см. Статистические характеристики связи видов и сообществ с засолением почв рассчитывались в программе STATISTICA. Для наглядности эти данные визуализированы в виде боксплотов (*box-and-whiskers diagram or plot, box plot* − график, использующийся в описательной статистике, компактно изображающий одномерное распределение вероятностей. Такой вид диаграммы в удобной форме показывает медиану (или, если нужно, среднее), нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы).

В целях выявления значимости видов («верности») для индикации степени засоления почв на разной глубине и для оценки возможности их численного прогноза использовались методы CART (дерево решений) и Random forest (случайный лес). Ниже даётся краткое описание каждого из них. Более подробное описание упомянутых методов и используемых алгоритмов дается в работе Л. Браймана с соавторами (Breiman et al., 1984). Модели CART и Random forest были рассчитаны с помощью библиотеки sklearn на языке Python. Точность прогноза подсчитывалась по формуле: Точность в %=100%–Ошибка в %.

Таблица 1. Оценка степени засоления почв по содержанию ионов Na и по содержанию водорастворимых солей на 100 г почвы.

Степень засоления	**Na^+ (ммоль(экв.)/100 г почвы)***
Незасоленные	1
Слабозасоленные	1-2
Среднезасоленные	2-4
Сильнозасоленные	4-8
Очень сильнозасоленные	>8

Примечания к таблице 1: * − критерии даны по «Засоленные почвы России …» (2006) для хлоридного и сульфатно-хлоридного химизма засоления.

CART (Classification and Regression Trees) – деревья классификации и регрессии – это алгоритм классификации данных, основанный на последовательном дихотомическом разделении данных на основе решающего правила (да/нет, больше/меньше порогового значения). Статистическим критерием для разделения на группы является коэффициент Джини: выбирается тот путь классификации, при котором значение коэффициента максимально. Построение этой модели (дерева) вместе с выбором критерия расщепления данных в каждом узле называется обучением. После обучения на обучающей выборке модель может быть использована для предсказания степени засоления почвы по видам растений на новой выборке.

Очень глубокие (то есть обладающие большим числом уровней) модели (деревья) могут хорошо классифицировать данные из обучающего набора, однако они, скорее всего, будут плохо работать на новых выборках. Это явление называется переобучением. Во избежание переобучения число уровней было ограничено до трех.

Метод CART интуитивен и допускает простую графическую интерпретацию. Существующая модификация этого метода, именуемая Random forest (с англ. – «случайный лес»), помогает избежать недостатков модели CART. Метод Random forest представляет собой ансамбль алгоритмов (деревьев) классификации, каждое из которых обучается независимо на случайной выборке данных, составляющей 70% от исходного обучающего набора. В отличие от метода CART, в данном методе нет ограничения на количество уровней и это не приводит к переобучению благодаря большому числу алгоритмов (деревьев) в ансамбле, каждое из которых обучалось независимо на своём наборе данных. После обучения новые данные прогоняются через каждый из алгоритмов (деревьев) ансамбля, и итоговое предсказание строится на основании «голосования по большинству». В данной задаче мы установили размер ансамбля равным 100.

Оба упомянутых метода позволяют определить, какие из видов растений являются наиболее значимыми для классификации (значимость предикторов – видов растений). Для этого в каждом узле дерева для каждого из видов рассчитывается коэффициент по следующий формуле:

$$\frac{N_t}{N} * \left(H - \frac{N_{t_R}}{N_t} * H_R - \frac{N_{t_L}}{N_t} * H_L\right) \quad (1),$$

где N – общее количество выборок, N_t – количество выборок в текущем узле, N_{tL} – количество выборок в левом дочернем узле, а N_{tR} – количество выборок в правом дочернем узле. Величины H, H_L, H_R обозначают примесь (impurity) Джини в текущем, левом дочернем и правом дочернем узлах соответственно. После этого результат суммируется по всем узлам дерева. Виды растений, имеющие наибольший коэффициент, считаются наиболее значимыми.

Использование двух методов помогает независимо проверить результаты индикационного значения видов и его использования для прогноза.

Результаты и обсуждение

Солевой профиль. На основании значений показателя aNa[4] (смоль(экв.)/кг почвы) был построен солевой профиль, представленный на рисунке 2.

На данной трансекте наблюдаются все градации засоления от незасоленных до очень сильнозасоленных почв (согласно критериям в таблице 1).

По глубине расположения верхней кровли засоленного горизонта различают солончаковые (если граница расположена в пределах верхних 30 см), солончаковатые (30-100 см), глубокосолончаковатые (100-150 см), глубокозасоленные (150-200 см) почвы. На рассматриваемой трансекте встречаются все перечисленные варианты. На рисунке 2 также хорошо видна особенность пространственного распределения солей в почве: их концентрация увеличивается с глубиной; в начале и конце трансекты (в западинах) почвы промыты от солей (не засолены) на глубину более 190 см (до 250 см). В центральной части засоление начинается с глубины 6-60 см.

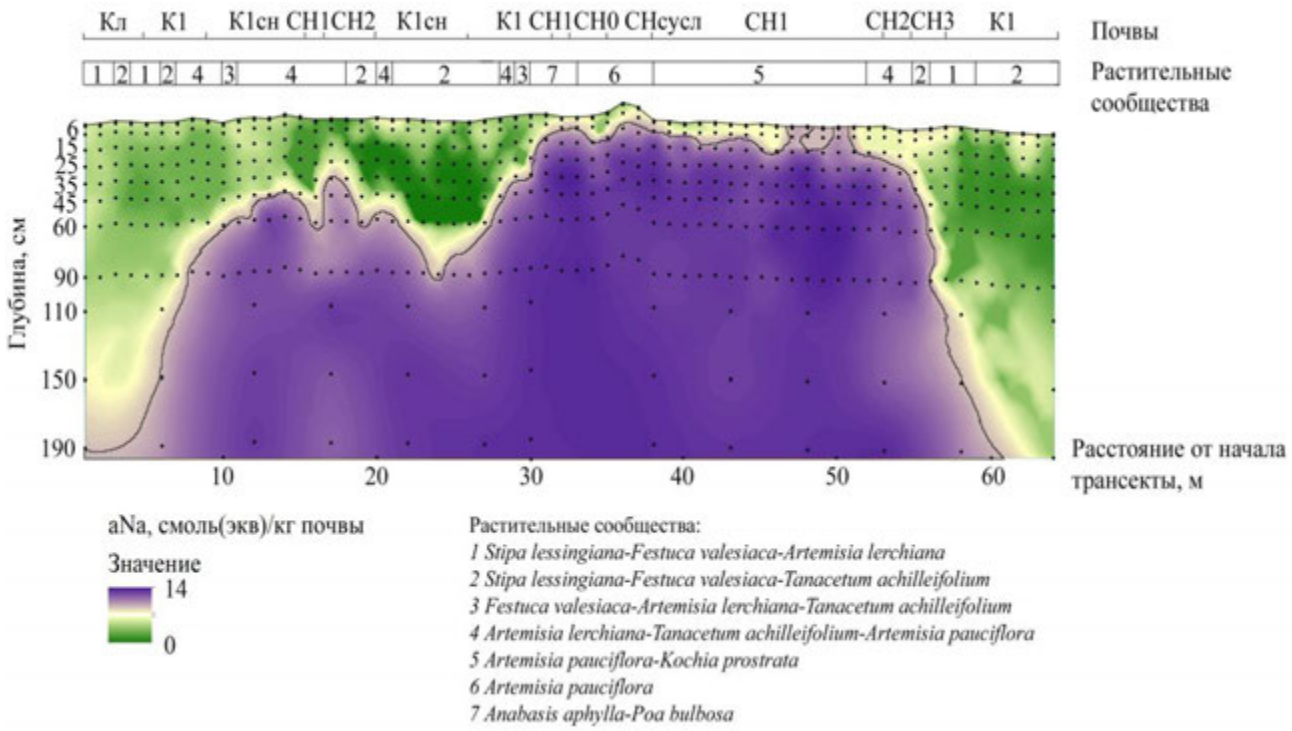

Рис. 2. Профиль засоления почвы (aNa, смоль(экв.)/кг почвы) вдоль трансекты и распределение растительных сообществ. *Условные обозначения* почв приведены в тексте. Точки показывают расположение образцов почвы (среднее значение глубины взятия пробы). Линия очерчивает границу между засоленным и незасоленным слоем ($aNa_{1:5}$=1 смоль(экв.)/кг почвы).

Растительность и засоление. Растительность представлена сообществами с господством видов, характерных для солонцовых комплексов степной зоны (*Stipa lessingiana, Festuca valesiaca, Tanacetum achilleifolium, Artemisia lerchiana, Kochia prostrata, Artemisia pauciflora*).

В ботанико-географическом отношении рассматриваемый район располагается в подзоне опустыненных степей (Лавренко, 2000; Сафронова, 2002) и основным типом растительности являются полынно-злаковые комплексы. Растительные сообщества, встреченные на трансекте, были отнесены к семи сообществам: 1 – белополынно-типчаково-лессинговоковыльное

[4] Показатель рассчитывается по формуле $aNa=10^{-pNa}$ (прим. авт.)

(*Stipa lessingiana+Festuca valesiaca+Artemisia lerchiana*), 2 – ромашниково-типчаково-лессинговоковыльное (*S. lessingiana+F. valesiaca+Tanacetum achilleifolium*), 3 – ромашниково-белополынно-типчаковое (*F. valesiaca+A. lerchiana+T. achilleifolium*), 4 – чернополынно-ромашниково-белополынное (*A. lerchiana+T. achilleifolium+Artemisia pauciflora*), 5 – чернополынно-прутняковое (*Artemisia pauciflora+Kochia prostrata*), 6 – чернополынное (*A. pauciflora*), 7 – безлистноежовниково-луковичномятликовое (*Anabasis aphylla+Poa bulbosa*).

Представление о распределении растительных сообществ на трансекте дает рисунок 2, откуда видно, что сообщества с господством ковыля Лессинга и типчака (рис. 2, № 1 и 2) располагаются в начале и конце трансекты, в западинах с лугово-каштановыми почвами, промытыми от солей на максимальную глубину. Исчерпывающую характеристику об отношении видов к засолению почв дают данные, полученные на основании материалов полевого обследования и обработанных в программе STATISTICA (табл. 2) для трех глубин. Анализ этих данных показал, что для каждого вида растения характерен свой диапазон значений засоления (табл. 2). Для наглядности эти данные визуализированы в виде боксплотов (рис. 3), показывающих разброс значения засоления для каждого вида растения (N>5).

Градации значений значимости, принятые в индикационной геоботанике (Викторов и др., 1962), на основании которых оценивается «верность» индикатора (значимость) и возможность использования его в качестве индикатора величины засоления почв, следующие: 60-74% – сомнительный индикатор, 75-89 % – удовлетворительный, более 90% – верный, 100 % – абсолютный.

Если переводить это понятие (верность индикатора) на тот язык, который использован в таблице 2 и на рисунке 3, то можно их связать следующим образом. Если взять значения индиката (засоления почв) от минимума до верхнего квартиля или от нижнего квартиля до максимума, то мы получим 75% распределения или, другими словами, диапазон значений будет соответствовать 75%-му уровню верности индикатора (в категориях С.В. Викторова). Абсолютная (100%-ная) верность индикатора достигается при значениях индиката от минимума до максимума. В диапазоне от верхнего до нижнего дециля верность индикатора – 80%, выше нижнего дециля или ниже верхнего дециля – 90%. Таким образом, можно охарактеризовать все категории верности индикатора от удовлетворительных до абсолютных.

В качестве примера рассмотрим вид *Stipa lessingiana* и засоление верхних 30 см почв. С верностью 75% (в категориях С.В. Викторова с соавторами (1962)) можно индицировать засоленность верхних 30 см почв в пределах от 0.03 до 0.17 смоль(экв.)/кг почвы, что соответствует незасоленным почвам. С верностью 90% – от 0.03 до 2.01 смоль(экв.)/100 г почвы, что соответствует незасоленным и слабозасоленным почвам. С верностью 100% – от 0.03 до 3.86 смоль(экв.)/100 г почвы, что соответствует по степени засоления (табл. 1) незасоленным, слабо- и среднезасоленным почвам. Таким образом, *S. lessingiana* является удовлетворительным индикатором для незасоленных почв, верным индикатором для незасоленных и слабозасоленных и абсолютным для группы незасоленные, слабо- и среднезасоленные почвы (в слое 0-30 см). Также его присутствие с абсолютной верностью указывает на то, что почвы в верхних 30 см не являются сильно- и очень сильнозасоленными.

Анализ полученных статистических характеристик засоления (табл. 2, рис. 3) в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см для каждого из выбранных 12 видов растений, встреченных на трансекте и характерных для средней подзоны степной зоны (сухой степи) Прикаспийской низменности на территории Республики Калмыкии, показывает диапазон значений и степень засоления почв, на которых они встречены.

Это, в свою очередь, позволило выделить три группы растений по отношению к засолению: 1 – приуроченные к незасоленным почвам с узким диапазоном значения содержания солей: *Stipa lessingiana , Tanacetum achilleifolium, Festuca valesiaca, Limonium caspium*; 2 – с широким диапазоном в отношении засоления и с предпочтением к незасоленным почвам (*Anabasis aphylla, Artemisia lerchiana, Poa bulbosa*), 3 – солелюбивые и солевыносливые (*Bassia sedoides, Artemisia austriaca, Leymus ramosum, Kochia prostrata, Artemisia pauciflora*), приуроченные к засоленным и сильно засоленным почвам.

Приуроченность *S. lessingiana, T. achilleifolium, F. valesiaca, L. caspium* к узкому диапазону значений засоления почв делает перечисленные виды предпочтительными для целей индикации, т.к. позволяет указывать конкретные значения засоления.

Таблица 2. Основные статистические характеристики засоления почв (aNa, смоль(экв.)/кг почвы) под различными видами растительности.

Глубина, см	№ набл.	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Нижний дециль	Верхний дециль	Стандартное отклонение	Эксцесс
Stipa lessingiana											
0-30	28	0.45	0.11	0.03	3.86	0.08	0.17	0.05	2.01	1.03	8.07
0-50	28	0.82	0.10	0.02	7.01	0.08	0.20	0.04	4.64	1.95	6.68
0-100	28	1.60	0.60	0.06	8.82	0.13	1.56	0.08	6.69	2.44	3.72
Tanacetum achilleifolium											
0-30	30	0.41	0.11	0.04	5.96	0.08	0.20	0.05	0.56	1.11	23.35
0-50	30	0.66	0.11	0.04	8.00	0.07	0.23	0.05	1.69	1.67	13.93
0-100	30	1.24	0.42	0.06	8.00	0.11	1.54	0.07	3.46	1.92	5.97
Festuca valesiaca											
0-30	39	0.52	0.12	0.03	5.96	0.08	0.20	0.05	2.01	1.25	10.90
0-50	39	0.86	0.11	0.02	8.00	0.07	0.24	0.04	4.64	2.04	6.84
0-100	39	1.58	0.64	0.06	8.82	0.13	1.68	0.07	6.69	2.37	3.73
Limonium caspium											
0-30	16	0.49	0.12	0.07	3.85	0.10	0.19	0.07	2.01	1.01	8.88
0-50	16	0.96	0.11	0.06	6.97	0.09	0.77	0.06	4.64	1.96	6.38
0-100	16	1.90	0.77	0.06	8.26	0.09	2.95	0.06	6.69	2.52	1.85
Anabasis aphylla											
0-30	9	0.99	0.16	0.03	3.36	0.06	2.38	0.03	3.36	1.37	-1.10
0-50	9	1.53	0.15	0.02	4.93	0.08	4.01	0.02	4.93	2.17	-1.50
0-100	9	2.52	1.53	0.08	6.09	0.45	5.27	0.08	6.09	2.55	-1.60
Artemisia lerchiana											
0-30	45	1.20	0.19	0.04	5.96	0.10	1.72	0.07	3.85	1.61	0.87
0-50	45	2.14	0.44	0.04	8.08	0.09	4.50	0.06	5.89	2.62	-0.62
0-100	45	3.28	1.75	0.06	8.82	0.38	6.34	0.08	7.89	3.09	-1.36
Poa bulbosa											
0-30	46	1.20	0.28	0.03	5.10	0.09	2.38	0.06	3.36	1.43	-0.02
0-50	46	2.20	0.79	0.02	8.09	0.09	4.46	0.05	5.22	2.40	-0.96
0-100	46	3.40	2.20	0.06	8.82	0.41	6.09	0.08	7.00	2.96	-1.46
Bassia sedoides											
0-30	10	1.60	1.43	0.07	3.36	0.38	2.56	0.06	3.23	1.21	-1.40
0-50	10	2.92	3.68	0.06	5.55	0.81	4.41	0.05	5.08	2.02	-1.44
0-100	10	4.61	5.93	0.06	7.00	2.45	6.41	0.07	6.73	2.69	-0.43
Artemisia austriaca											
0-30	15	1.43	1.52	0.07	5.10	0.11	1.72	0.08	4.23	1.59	0.87
0-50	15	2.66	2.11	0.06	8.09	0.10	4.72	0.07	5.89	2.68	-0.95
0-100	15	3.95	4.72	0.06	8.69	0.08	7.01	0.06	8.46	3.59	-1.96
Leymus ramosum											
0-30	20	1.78	1.57	0.06	5.10	0.33	3.03	0.07	4.03	1.55	-0.65
0-50	20	3.31	4.12	0.06	8.09	0.50	4.98	0.07	5.72	2.40	-0.92
0-100	20	4.66	5.85	0.06	8.69	2.20	6.61	0.07	8.14	2.92	-1.08
Kochia prostrata											
0-30	29	1.84	1.62	0.07	5.10	0.38	2.96	0.08	3.86	1.46	-0.80
0-50	29	3.42	4.25	0.06	8.09	0.92	4.93	0.06	5.89	2.27	-0.84
0-100	29	4.99	5.85	0.06	8.82	3.45	6.47	0.08	8.46	2.64	-0.41
Artemisia pauciflora											
0-30	20	2.06	1.65	0.07	5.10	1.01	3.07	0.10	4.03	1.43	-0.52
0-50	20	3.73	4.33	0.06	8.09	2.41	4.84	0.10	5.56	2.04	0.39
0-100	20	5.34	5.97	0.08	8.69	4.60	6.58	0.98	7.73	2.34	0.79

Из встреченных семи растительных сообществ (рис. 4) два распространены на незасоленных почвах (до глубины 2 м): белополынно-типчаково-лессинговоковыльное (*Stipa lessingiana+Festuca valesiaca+Artemisia lerchiana*) и ромашниково-типчаково-лессинговоковыльное (*S. lessingiana+F. valesiaca+Tanacetum achilleifolium*); к незасоленным почвам с поверхности в пределах 0-25 (50) см тяготеют ромашниково-белополынно-типчаковое (*F. valesiaca+A. lerchiana+T. achilleifolium*) и чернополынно-ромашниково-белополынное (*A. lerchiana+T. achilleifolium+Artemisia pauciflora*); исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см встречаются чернополынно-прутняковое (*A. pauciflora+Kochia prostrata*), чернополынное (*A. pauciflora*), и безлистноежовниково-луковичномятликовое (*Anabasis aphylla+Poa bulbosa*).

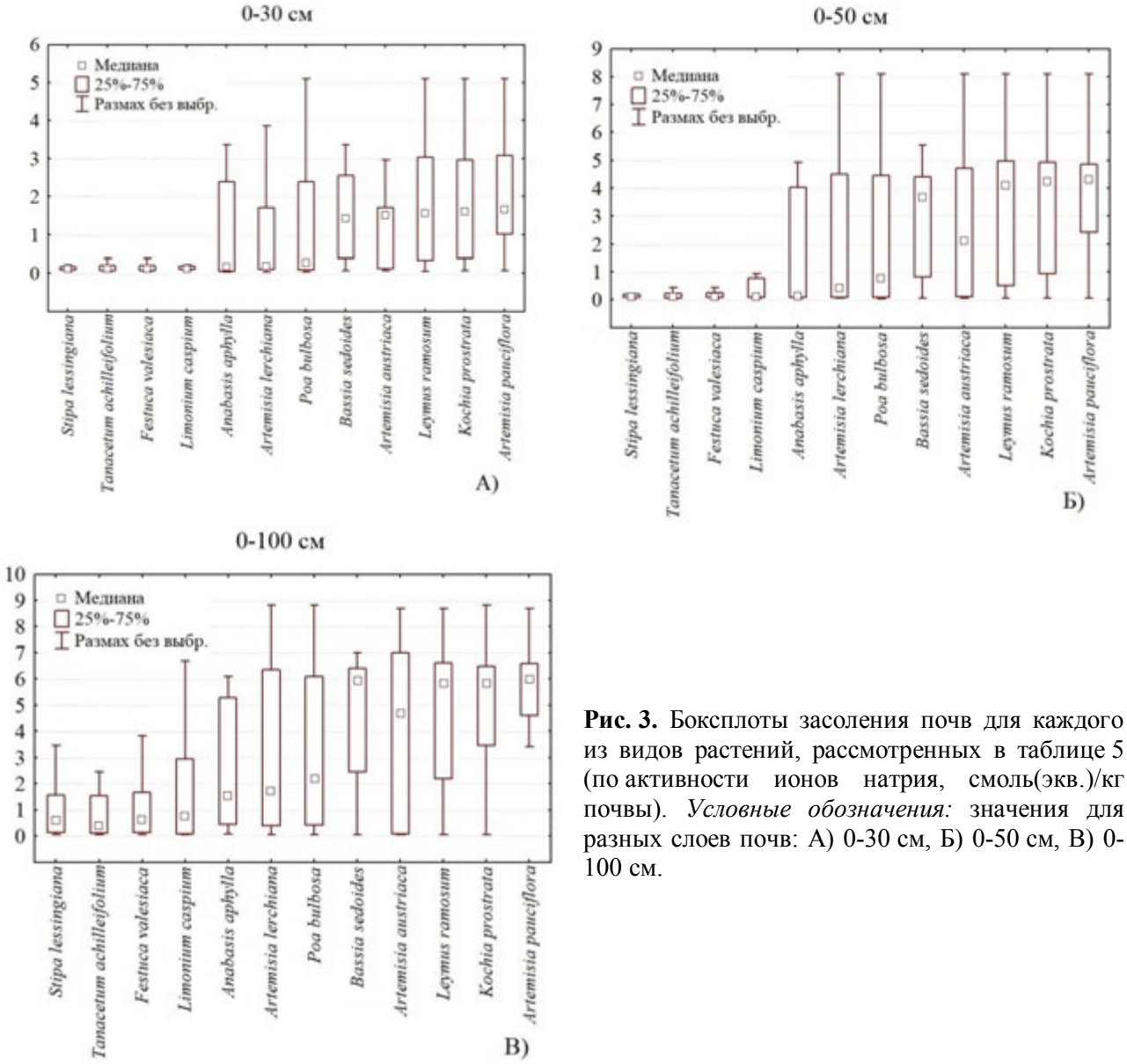

Рис. 3. Боксплоты засоления почв для каждого из видов растений, рассмотренных в таблице 5 (по активности ионов натрия, смоль(экв.)/кг почвы). *Условные обозначения:* значения для разных слоев почв: А) 0-30 см, Б) 0-50 см, В) 0-100 см.

Анализ видов растений с помощью метода CART (рис. 5) на предмет их принадлежности к степени почвенного засоления (от незасоленного до очень сильнозасоленного) на основе данных о присутствии или отсутствии растений в качестве предикторов позволил правильно классифицировать 51 наблюдение из 64 (80%) в слое 30 см, 52 наблюдения из 64 (81%) в слое 50 см и 41 наблюдение из 64 (64%) в слое 100 см.

На рисунке 5 результаты отнесения наблюдений к тому или иному классу засоления даны в

скобках в строке Value, где для слоя 0-30 см (рис. 5А) первое значение – это количество наблюдений, попавших в класс незасоленных почв, второе – в класс слабозасоленных почв, третье – в класс среднезасоленных почв, четвертое – в класс сильнозасоленных почв. Для слоя 0-50 см (рис. 5Б) последовательность классов следующая: незасоленные, средне-, сильно- и очень сильнозасоленные. Для слоя 0-100 см (рис. 5В) последовательность классов: незасоленные, слабо-, средне-, сильно- и очень сильно засоленные почвы. Для примера рассмотрим первое дерево (рис. 5А). Здесь в самом верхнем узле решающее правило: *Festuca valesiaca* ≤0.5 (т.е.=0, отсутствует). Рассматриваются все случаи из обучающей выборки (64 наблюдения): 42 из них на незасоленных почвах, 7 – на слабозасоленных, 12 – на среднезасоленных, 3 – на сильнозасоленных. В случае положительного ответа на этот вопрос (True, т.е. да, *F. valesiaca* отсутствует), мы попадаем в левую часть дерева. В случае отрицательного ответа (False, т.е. нет, *F. valesiaca* присутствует), мы попадаем в правую часть дерева. Здесь мы продолжаем делить выборку на подгруппы в зависимости от решающего правила. И так до конца, пока не будет достигнут тот уровень глубины дерева, который был задан пользователем; в нашем случае это 3.

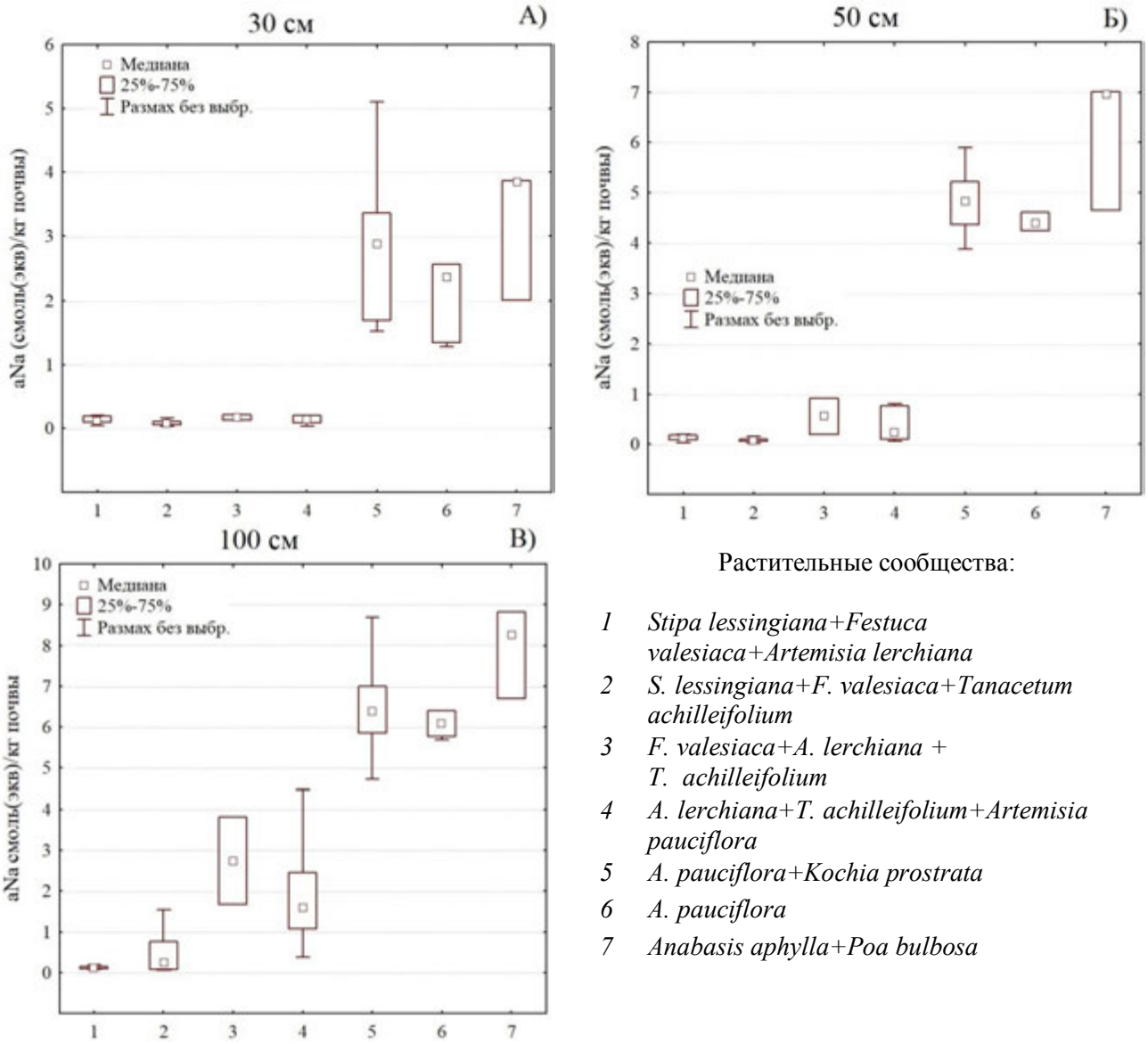

Рис. 4. Боксплоты засоления почв для выделенных растительных сообществ (по активности ионов натрия, смоль(экв.)/кг почвы). *Условные обозначения:* значения для разных слоев почв: А) 0-30 см, Б) 0-50 см, В) 0-100 см.

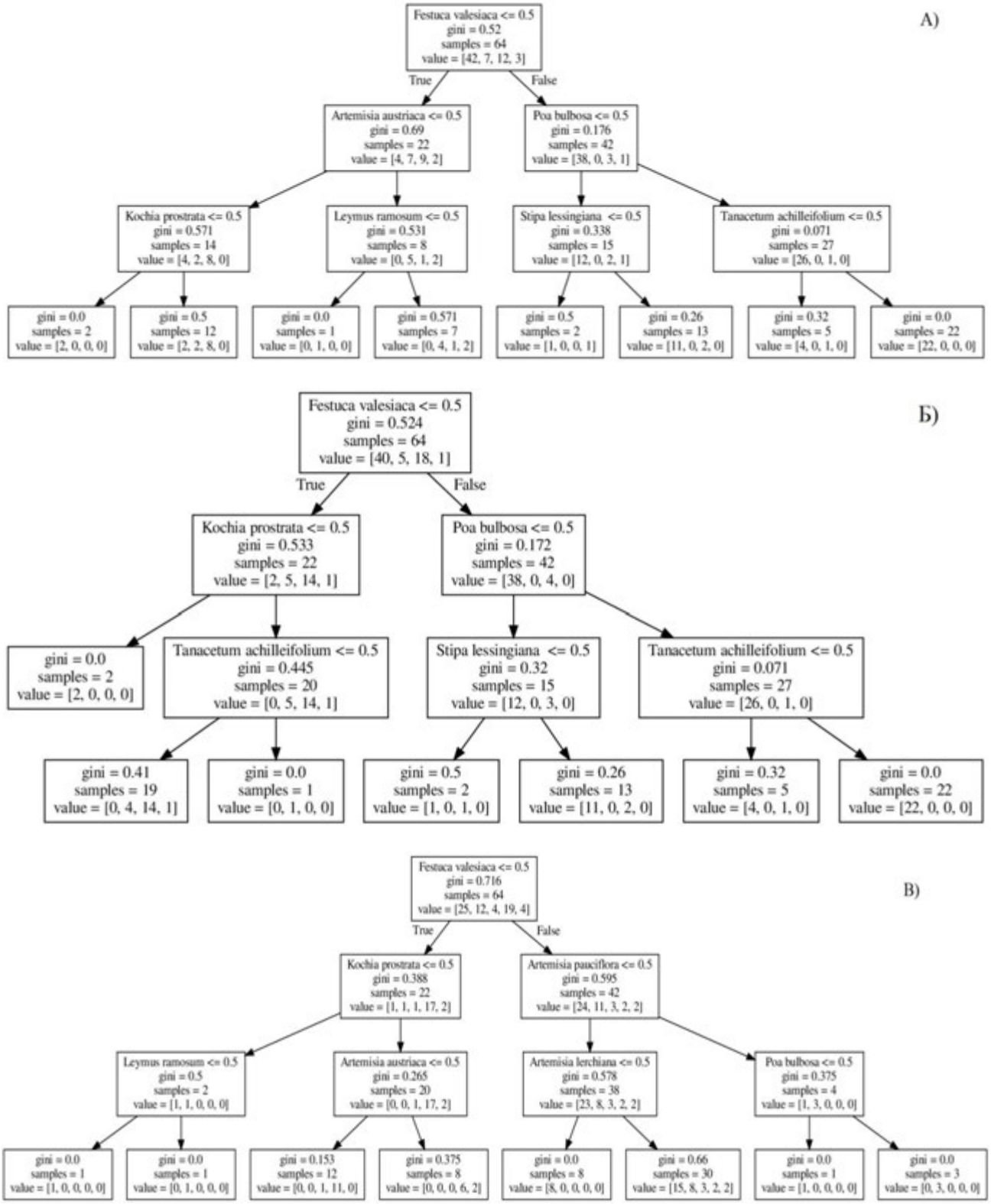

Рис. 5. Структура моделей (деревьев решений) в методе CART для слоев 0-30 (А), 0-50 (Б) и 0-100 см (В). Пояснения даны в тексте статьи.

В результате использования метода CART получились следующие значимые растения-предикторы (ранг переменной >60): *Kochia prostrata, Tanacetum achilleifolium, Artemisia austriaca, Festuca valesiaca* для слоя глубиной 30 см, *F. valesiaca, T. achilleifolium, K. prostrata* для слоя

глубиной 50 см, *F. valesiaca* и *K. prostrata* для слоя глубиной 100 см (табл. 3). Остальные виды показали низкие значения важности в качестве предикторов (индикаторов).

Проверка 100 случайных выборок для слоя глубиной 50 см в методе CART показала среднее значение точности предсказания степени засоления почв для обучающих выборок – 86.5%, для контрольных выборок – 78.6%. Объем обучающих выборок составил 70%, контрольных – 30%.

Метод Random Forest сумел правильно классифицировать 29 наблюдений из 39 (обучающая выборка) и 17 из 25 (тестовая выборка) для слоя 0-30 см, 31 наблюдение из 39 (обучающая выборка) и 21 из 25 (тестовая выборка) для слоя 0-50 см, 23 наблюдения из 39 (обучающая выборка) и 18 из 25 (тестовая выборка) для слоя 0-100 см. Точность предсказания тестовой выборки составила 68%, 84% и 72% соответственно. Значимыми растениями для классификации (ранг переменной >60) в слое глубиной 30 см являются *Festuca valesiaca* и *Tanacetum achilleifolium*, в слое глубиной 50 см – *Festuca valesiaca*, в слое глубиной 100 см – *Artemisia pauciflora, Kochia prostrata, Tanacetum achilleifolium, Festuca valesiaca*. Остальные виды оказались незначимыми для классификации.

Таблица 3. Значимость предикторов (видов растений) для предсказания степени засоления почв по двум разным методам: CART и Random Forest.

CART	**0-30 см**		**0-50 см**		**0-100 см**	
	ранг	**значимость**	**ранг**	**значимость**	**ранг**	**значимость**
Anabasis aphylla	31	0.31	2	0.02	1	0.11
Artemisia lerchiana	10	0.10	3	0.03	7	0.07
Artemisia pauciflora	44	0.44	54	0.54	57	0.57
Kochia prostrata	100	1.00	65	0.65	70	0.70
Artemisia austriaca	82	0.82	6	0.06	8	0.08
Festuca valesiaca	81	0.81	100	1.00	100	1.00
Leymus ramosum	30	0.30	31	0.31	29	0.29
Limonium caspium	16	0.16	19	0.19	16	0.16
Poa bulbosa	10	0.10	11	0.11	12	0.12
Stipa lessingiana	34	0.34	42	0.42	53	0.53
Tanacetum achilleifolium	92	0.92	70	0.70	56	0.56
Bassia sedoides	26	0.26	14	0.14	23	0.23
Random Forest	**ранг**	**значимость**	**ранг**	**значимость**	**ранг**	**значимость**
Anabasis aphylla	5	0.05	5	0.05	17	0.17
Artemisia lerchiana	16	0.16	12	0.12	29	0.29
Artemisia pauciflora	57	0.57	37	0.37	100	1.00
Kochia prostrata	25	0.25	22	0.22	90	0.90
Artemisia austriaca	39	0.39	30	0.30	31	0.31
Festuca valesiaca	100	1.00	100	1.00	75	0.75
Leymus ramosum	26	0.26	29	0.29	57	0.57
Limonium caspium	21	0.21	18	0.18	23	0.23
Poa bulbosa	21	0.21	26	0.26	24	0.24
Stipa lessingiana	34	0.34	41	0.41	53	0.53
Tanacetum achileifolium	67	0.67	49	0.49	90	0.90
Bassia sedoides	20	0.20	21	0.21	29	0.29

Таким образом, использованные методы дают наилучшее предсказание для слоя 0-50 см, чуть хуже для слоя 0-30 см и наименьшую точность для слоя 0-100 см. В целом, оба метода дают сходный уровень точности предсказания.

Выводы

Использование современных компьютерных программ и методов для обработки и анализа сопряженных данных о распространении растений и засолении почв позволило получить численное значение диапазона засоления почв и количественные значение его статистических характеристик для исследованных видов и сообществ, установить тесноту связи со степенью засоления на разной глубине, оценить верность их индикационного значения. Построены модели связей видов и засоления почв, оценена возможность индикации на их основе.

Для каждого из 12 видов растений, характерных для солонцовых комплексов в средней подзоне степной зоны (сухой степи) Прикаспийской низменности на территории Республики Калмыкия, в результате проведенного исследования определены статистические характеристики количественного значения засоления почв в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см на участках, где они были встречены на трансекте длиной 64 м.

Это позволило сделать обобщение и выделить три группы растений по отношению к степени засоления почв: приуроченные к незасоленным почвам с узким диапазоном значений содержания солей (*Stipa lessingiana, Tanacetum achilleifolium, Festuca valesiaca, Limonium caspium*); с широким диапазоном в отношении засоления, с предпочтением к незасоленным почвам (*Anabasis aphylla, Artemisia lerchiana, Poa bulbosa*); и солелюбивые виды (галофиты), т.е. остальные 5 видов (*Bassia sedoides, Artemisia austriaca, Leymus ramosum, Kochia prostrata, Artemisia pauciflora*), приуроченные к засоленным и сильно засоленным почвам.

Приуроченность *S. lessingiana, T. achilleifolium, F. valesiaca, L. caspium* к узкому диапазону значений засоления почв делает их предпочтительными индикаторами конкретных значений засоления почв.

Из встреченных семи растительных сообществ два распространены на незасоленных почвах: белополынно-типчаково-лессинговоковыльное (*S. lessingiana+F. valesiaca+A. lerchiana*) и ромашниково-типчаково-лессинговоковыльное (*S. lessingiana+F. valesiaca+T. achilleifolium*); к незасоленным почвам в пределах 0-50 см тяготеют ромашниково-белополынно-типчаковое (*F. valesiaca+A. lerchiana+T. achilleifolium*) и чернополынно-ромашниково-белополынное (*A. lerchiana+T. achilleifolium+A. pauciflora*); исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см встречаются чернополынно-прутняковое (*A. pauciflora+K. prostrata*), чернополынное (*A. pauciflora*), и безлистноежовниково-луковичномятликовое (*A. aphylla+P. bulbosa*).

Использование метода CART позволило установить индикационное значение видов в отношении степени почвенного засоления и построить модели на предмет их принадлежности к степени почвенного засоления (от незасоленного до очень сильнозасоленного). Точность предсказания степени засоления по полученной модели в слое 0-30 см – 80%, в слое 0-50 см – 81%, в слое 0-100 см – 64%. Значимыми растениями-предикторами (ранг переменной >60) оказались *K. prostrata, T. achilleifolium, A. austriaca* и *F. valesiaca*. Остальные виды показали низкие значения важности в качестве предикторов. Использование метода Random Forest показало точность определения степени засоления почв 79%.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за помощь в работе С.С. Улановой, И.Н. Семенкову, А.А. Контобойцевой, Исину Фэну, Н.М. Церенову, У.Ю. Улюмджиеву, а также безвременно ушедшим от нас организатору и участнику этих исследователей, известному почвоведу и специалисту по солонцам, к.с.х.н. Александре Федоровне Новиковой и участнику этих работ, известному исследователю аридных территорий геоботанику Марине Борисовне Шадриной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Виноградов Б.В. 1964. Растительные индикаторы и их использование при изучении природных ресурсов. М.: Высшая школа. 328 с.

Викторов С.В., Востокова Е.А., Вышивкин Д.Д. 1962. Введение в индикационную геоботанику. М.: зд-во МГУ. 227 с.

Волкова Н.А. 2005. Геоэкологическая характеристика природно-территориальных комплексов современного гидроморфизма (на примере юго-восточных отрогов Донецкого кряжа): Дисс. ... канд. геогр. наук. М. 237 с.

Димо Н.А., Келлер Б.А. 1907. В области полупустыни. Почвенные и ботанические исследования на юге Царицынского уезда Саратовской губернии. Саратов: Изд-во Саратовского губернского земства. 215 с.

Доскач А.Г. 1979. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука. 142 с.

Жудова П.П. 1955. Некоторые данные о растениях-индикаторах почвенных и лесорастительных условий // Вестник Московского университета. Серия физико-математическая и естественных наук. Вып. 2. С. 119-122.

Засоленные почвы России. 2006. М.: Академкнига. 854 с.

Келлер Б.А. 1912. Ботанико-географические исследования в Зайсанском уезде Семипалатинской области. Ч. I. Очерк растительности Кальджирской долины // Труды почвенно-ботанической экспедиции по исследованию колонизационных районов Азиатской России. СПб. 209 с.

Лавренко Е.М. 2000. Степи // Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука. С. 203-272.

Ларин И.В. 1926. Растительность, почвы и с.-х. оценка Чижинских разливов. Л. 152 с.

Ларин И.В. 1929. Опыт определения по растительному покрову почв, материнских пород, рельефа, сельскохозяйственных угодий и других элементов ландшафта в средней части Уральской губернии // Труды Общества изучения Казахстана. Отделение естествознания и географии. Кзыл-Орда. Т. 7. Вып. 1. С. 1-44.

Левина Ф.Я. 1954. Микрокомплексы области бессточных рек междуречья Волга-Урал, основные черты их структуры и развития // Вопросы улучшения кормовой базы в степных, полупустынных и пустынных зонах СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР. С. 191-209.

Леонтьев В.Л. 1952. Растения, пригодные для закрепления берегов и дамб главного Туркменского канала // Ботанический журнал. Т. XXXVII. № 4. С. 334-341.

Новикова Н.М., Конюшкова М.В., Уланова С.С. 2017. Межкомпонентные экологические взаимосвязи в солонцовом природном комплексе Северной Сарпинской равнины (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 23. № 4 (73). С. 11-21.

Орлов Д.С. 1980. Активности ионов и диссоциация катионсодержащих компонентов почвенного поглощающего комплекса // Проблемы диагностики и мелиорации солонцов / Ред. Г.Н. Мартыненко. Новочеркасск: НИМИ. С. 27-36.

Раменский Л.Г. 1938. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое обследование земель. М.: Сельхозгиз. 620 с.

Раменский Л.Г. 1950. Классификация земель по их растительному покрову // Проблемы ботаники. Вып. 1. С. 484-512.

Сафронова И.Н. 2002. О фитоценотическом разнообразии опустыненных степей Причерноморско-Казахстанской подобласти Евразиатской степной области // Геоботаническое картографирование 2001-2002. СПб: БИН РАН. С. 44-65.

Тумин Г.М. 1910. Почвы южной части Атбасарского уезда Акмолинской области // Труды почвенно-ботанических экспедиций по исследованию колонизационных районов Азиатской России. СПб: типография Ю.Н. Эрлиха. 98 с.

Федоров Б.В. 1930. Определение степени осолонения почв по растительному покрову // Голодностепская с.-х. опытная станция, отдел солончаковых почв. Вып. 10. 42 с.

Хитров Н.Б., Рухович Д.И., Калинина Н.В., Новикова А.Ф., Панкова Е.И., Черноусенко Г.И. 2003. Электронная версия карты засоления почв масштаба 1:2.5 млн. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 1 л.

Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб: Мир и семья-95. 992 с.

Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. 1984. Classification and Regression Trees. Wadsworth, Belmont, CA. 368 p.

Bui E.N., Henderson B.L. 2003. Vegetation indicators of salinity in northern Queensland // Australian Ecology. No. 28. P. 539-552.

Fireman M., Hayward H.E. 1952. Indicator significance of some shrubs in the Escalante desert, Utah // Botanical Gazette. Vol. 114. No. 2. P. 143-155.

Karadağ S., Eren E., Çetinkaya E., Özen S., Deveci S. 2016. Optimization of sodium extraction from soil by using a central composite design (CCD) and determination of soil sodium content by ion selective electrodes // Eurasian Journal of Soil Science. No. 5 (2). P. 89-96.

Piernik A. 2003. Inland halophilous vegetation as indicator of soil salinity // Basic Applied Ecology. No. 4. P. 525-536.

Prescott J.A. 1931. The soils of Australia in relation to vegetation and climate // Council for Scientific and Industrial Research (Australia). Bull. No. 52. 82 p.

Skerman P.J. 1948. Use of vegetation in locating solonetz soils in Queensland // Queensland Journal of Agricultural Science. Vol. 5. No. 1. P. 17-22.

Wierda A., Fresco L.F.M., Grootjans A.P., van Diggelen, R. 1997. Numerical assessment of plant species as indicators of the groundwater regime // Journal of Vegetation Science. No. 8 (5). P. 707-716.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 82-89

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 631.47:528.94

ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ АГРОЧЕРНОЗЕМОВ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В ОРОСИТЕЛЬНОЙ МЕЛИОРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОЙ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

© 2021 г. Р.Р. Сулейманов*, **, Г.М. Гизатшина, И.М. Габбасова***

**Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН*
Россия, 450054, г. Уфа, ул. Проспект Октября, д. 69. E-mail: soils@mail.ru
***Башкирский государственный университет*
Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32. E-mail:gulnazgizatshina@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.11.2020. После доработки 29.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020

В условиях проявления тенденции аридизации климата возникает необходимость проведения оросительной мелиорации в целях устойчивого получения высоких урожаев сельскохозяйственной продукции. В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства возникает угроза деградации почвенного покрова. В этом аспекте изучение ряда свойств почв, планируемых для использования в орошаемом земледелии, имеет большое значение для предотвращения угрозы их деградации. Почвенно-мелиоративное обследование агрочерноземов проводилось в пределах Предуральской южной лесостепной зоны (Стерлитамакский район, Республика Башкортостан). Результаты исследований показали, что почвенный покров изученного участка представлен черноземами типичными и выщелоченными. По своим водно-физическим, физико-химическим, агрохимическим и экологическим свойствам они близки между собой, характеризуются высокой устойчивостью к деградационным процессам и пригодны для использования в оросительной мелиорации.

Ключевые слова: агрочернозем, орошения, водно-физические, физико-химические, агрохимические, экологические свойства.
DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10153

В условиях изменения климата в районах с периодически повторяющимися засухами для получения устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур оросительная мелиорации является одним из способов решения проблемы, при этом являясь мощным экологическим фактором, оказывающим воздействие на весь комплекс свойств почв (Elgallal et al., 2016) . Например, показано, что орошение может значительно увеличивать содержание питательных веществ (N, P, K) и микроэлементов, тем самым повышая плодородие почвы и урожайность сельскохозяйственных культур (Mendoza-Espinosa et al., 2008; Jahany, 2020). В качестве наиболее значимых показателей, отражающих качественное состояние почв, являются кислотность почв, электропроводность, содержание подвижного фосфора и органического вещества (Abd-Elwahed, 2019).

Тем не менее, долгосрочное стойкое орошение может привести к некоторым непреднамеренным изменениям качества почвы – развитию эрозии, засолению и осолонцеванию, загрязнению тяжелыми металлами (Wang et al., 2003). Негативное воздействие оросительной мелиорации влечет такие проблемы, как потеря урожайности сельскохозяйственных культур, снижение плодородия почв и продуктивности, а также повышенного уровня деградации (Rezapour et al., 2019)

В ряде исследований (Bedbabis et al., 2014) показано снижение pH почвы после орошения как в полевых, так и в тепличных условиях. Это привело к выщелачиванию питательных элементов, нитрификации аммония или поглощению ионов аммиака урожаем. Также в других исследованиях (Aydin et al., 2015) наблюдается увеличение pH почвы при двукратном орошении, как следствие содержания высоких значений основных катионов в воде.

В связи с этим на участках, используемых в оросительной мелиорации, необходимо ведение мониторинга основных свойств почв (морфологических, водно-физических и агрохимических) в целях оценки их состояния и своевременного предотвращения развития процессов деградации, что и явилось целью наших исследований.

Объекты и методы исследования

Почвенно-мелиоративную оценку земель, находящихся в сельскохозяйственном использовании, проводили на участке, расположенном в Стерлитамакском районе Республики Башкортостан. Следует отметить, что данный участок уже использовался под оросительную мелиорацию в период с 1981 по 1992 гг., но в дальнейшем использование прекратили по экономическим причинам. Согласно физико-географическому районированию, участок расположен в Левобережном Прибельском округе Южно-лесостепной подзоны, а, в соответствии с агропочвенным районированием, относится к Чермасано-Ашкадарскому равнинному агропочвенному округу Предуральской степной зоны (Почвы …, 1995). Климат континентальный, незначительно засушливый (Физико-географическое …, 1964). Почвенный покров представлен черноземами, которые сформировались на водораздельном плато и пологих склонах северной, северо-западной, северо-восточной и частично юго-восточной экспозиции. Почвообразующими породами являются делювиально-карбонатные глины.

Первый этап, включающий в себя полевое обследование, проводился согласно методикам как оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов, так и почвенного картирования (Витковская, 2011; Апарин и др., 2012). Согласно этим методикам, почвенные разрезы закладывались по периметру и на самом опытном поле из расчета 1-2 разреза на 1 га, а также разрезы и прикопки на всех элементах мезорельефа. В общей сложности было заложено 16 полнопрофильных разрезов и 20 прикопок для определения границ между почвенными разностями.

После закладки разреза или прикопки проводилось описание морфологических признаков почвенного профиля, отбор почвенных образцов по генетическим горизонтам, а также определялась водопроницаемость почв с поверхности и с глубины 50 см методом цилиндров (Теории …, 2007).

Соответственно, второй этап по мелиоративной оценке агрочерноземов включал в себя определение их физико-химических, агрохимических и водно-физических свойств. В образцах определялось содержание гумуса по Тюрину, подвижный фосфор и обменный калий по Чирикову, щелочно-гидролизуемый азот по Корнфильду, pH водной суспензии – потенциометрически, обменные Ca^{2+}и Mg^{2+} – комплексометрически, обменный Na^{+} – вытеснением уксуснокислым аммонием по Антипову-Каратаеву, емкость катионного обмена (ЕКО) по Шаймухаметову, содержание микроэлементов по Крупскому-Александровой, водно-физические свойства – общепринятыми в почвоведении методами (Агрохимические …, 1976; Аринушкина, 1970; Вадюнина, Корчагина, 1973; Теории …, 2007).

Результаты и их обсуждение

Морфологические свойства почв. Проведенное полевое обследование показало, что почвенный покров опытного участка в целом однородный и представлен двумя подтипами черноземов – типичными и выщелоченными.

Около 70% исследуемого массива приходятся на черноземы типичные, характеризующиеся наличием карбонатов в пределах гумусово-аккумулятивного горизонта или сразу же под ним, которые выделяются в виде мицелия или прожилок конкреций. Иллювиальные горизонты (В) всегда карбонатные. Морфологические особенности определяются наличием относительно мощного гумусового горизонта (горизонты А+АВ мощностью 76-89 см) темно-серой или почти черной окраски, пахотный слой которого характеризуется порошисто-комковатой, а подпахотный – зернистой структурой, которая ниже в горизонте АВ становится крупнозернистой. Сложение профиля довольно рыхлое. Для более полной характеристики морфологических свойств чернозема типичного приведем ниже описание разреза, заложенного на выровненном участке пашни.

$А_{пах.}$ 0-28 см. Темно-серый, почти черный, влажный, порошисто-комковатый, тяжелосуглинистый, среднеуплотнен, много корней, переход по линии вспашки.

$А_1$ 28-58 см. Темно-серый, влажный, комковато-зернистый, тяжелосуглинистый, среднеуплотнен, переход постепенный.

АВ 58-89 см. Темно-бурый с серым оттенком, влажный, комковато-зернистый, тяжелосуглинистый, уплотнен, мицелий карбонатов в нижней части, вскипает с 84 см, переход заметный.

В 89-118 см. Бурый, неравномерно окрашенный с гумусовыми затеками по ходам корней, влажный, ореховато-призматический, тяжелосуглинистый, непрочный, карбонаты в виде псевдомицелия и размягченных белых пятен, кротовины, переход постепенный.

С 118-150 см. Желтовато-бурый, сырой, непрочный, крупно-ореховато-комковатый, глинистый, псевдомицелий, размягченные пятна карбонатов, вскипает бурно.

На остальных 30% площади распространены черноземы выщелоченные, характеризующие интенсивной серо-черной окраской гумусово-аккумулятивного горизонта, хорошо выраженной зернистой структурой его подпахотной части, появлением буроватого оттенка в переходном горизонте АВ и укрупнением его структуры до комковато-зернистой. Мощность гумусового горизонта (А+АВ) варьирует в диапазоне от 46 до 82 см. Иллювиальный горизонт в этих почвах свободен от карбонатов, заметно уплотнен, отмечаются темные глянцевые пленки по граням структурных отдельностей. Вскипание карбонатов появляется в переходном иллювиально-карбонатном горизонте, а чаще – в карбонатной материнской породе. Для более полной характеристики морфологических свойств чернозема выщелоченного приведем ниже описание разреза, заложенного на выровненном участке пашни.

$А_{пах.}$ 0-28 см. Темно-серый, почти черный, сырой, непрочно-комковато-зернистый, рыхлый, тяжелосуглинистый, переход заметный по линии вспашки.

$А_1$ 28-60 см. Темно-серый, влажный, комковато-зернистый, более плотный, тяжелосуглинистый, переход заметный.

АВ 60-80 см. Темно-серый с буроватым оттенком, неравномерно прокрашенный, влажный, непрочно-комковато-зернистый, уплотнен, тяжелосуглинистый, переход заметный.

В 80-120 см. Коричневато-бурый, местами гумусовые потеки, влажный, комковато-ореховатый, темные глянцевые пленки по граням структурных отдельностей, плотный, переход постепенный.

$С_к$ 120-150 см. Желто-бурый, сырой, плотный, вязкий, глинистый, карбонатная пропитка, вскипает бурно.

Физико-химические и агрохимические свойства почв. Анализ физико-химических свойств чернозема типичного показал, что верхние гумусово-аккумулятивные горизонты характеризуются нейтральной реакцией среды, которая с глубиной изменяется до слабощелочной (табл. 1). Почва насыщена основаниями, в составе которых преобладает кальций. Количество обменного натрия в составе поглощенных катионов незначительно и составляет в профиле почвы 0.5-0.9% от емкости катионного обмена. По значениям емкости катионного обмена эти почвы относятся к почвам высоко устойчивым к антропогенным воздействиям (ЕКО>40 смоль (экв.)/кг почвы; Кирюшин, 1996). Профиль чернозема типичного также не засолен, содержание сухого остатка изменяется в диапазоне от 0.123 до 1.333%.

Таблица 1. Физико-химические свойства черноземов.

Индекс горизонта, глубина в см	pH H_2O	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	Емкость катионного обмена	Сухой остаток, %
		смоль(экв.)/кг почвы				
Чернозем типичный (среднее ± стандартное отклонение, n=16)						
$А_{пах.}$, 0-28	7.3±0.3	40.5±1.8	7.6±0.5	0.23±0.1	48.0±2.0	0.123±0.014
$А_1$, 28-58	7.3±0.3	36.9±4.1	7.7±0.8	0.30±0.07	44.6±3.5	0.128±0.02
АВ, 58-89	7.6±0.4	29.3±2.9	6.7±0.6	0.32±0.08	37.0±3.0	0.128±0.004
В, 89-118	8.2±0.2	28.0±1.0	6.3±1.2	0.22±0.02	34.7±3.5	0.133±0.01
С, 118-150	8.3±0.1	31.7±2.5	6.7±0.6	0.31±0.02	37.5±2.1	0.130±0.002
Чернозем выщелоченный (среднее ± стандартное отклонение, n=16)						
$А_{пах.}$, 0-28	6.6±0.3	38.0±2.6	8.6±1.3	0.31±0.09	47.4±2.7	0.115±0.043
$А_1$, 28-60	6.6±0.3	35.0±3.5	7.8±1.4	0.28±0.01	43.0±4.5	0.097±0.047
АВ, 60-80	6.6±0.2	29.7±0.6	6.7±1.2	0.27±0.01	36.4±0.8	0.112±0.002
В, 80-120	7.0±0.3	24.0±1.4	7.7±0.6	0.21±0.01	31.6±2.3	0.120±0.004
$С_к$, 120-150	8.2±0.2	24.3±1.5	7.0±1.0	0.22±0.01	30.0±0.8	0.122±0.003

Содержание гумуса в пахотном горизонте характеризуется как высокое и составляет в среднем 9.02%, с глубиной этот показатель постепенно снижается до 1.29% в горизонте С. По степени обеспеченности почв питательными элементами (Кирюшин, 1996) содержание щелочно-гидролизуемого азота характеризуется как высокое, подвижного фосфора – среднее, обменного калия – очень высокое (табл. 2).

Таблица 2. Агрохимические свойства черноземов.

Индекс горизонта, глубина в см	Гумус, %	Щелочно-гидролизуемый азот, мг/кг почвы	P_2O_5 подвижный	K_2O обменный
			мг/100 г почвы	
Чернозем типичный (среднее ± стандартное отклонение, n=16)				
$A_{пах.}$, 0-28	9.02±0.86	212±16	5.95±1.57	233±48
A_1, 28-58	6.59±1.1	138±23	5.07±0.32	210±57
AB, 58-89	3.63±1.1	92±12	6.61±0.32	245±34
B, 89-118	1.59±0.53	65±14	6.60±1.28	159±17
C, 118-150	1.29±0.4	33±4	2.31±0.36	142±9
Чернозем выщелоченный (среднее ± стандартное отклонение, n=16)				
$A_{пах.}$, 0-28	9.65±1.39	216±17	6.21±1.01	258±67
A_1, 28-60	7.39±0.9	147±31	5.24±0.42	168±36
AB, 60-80	4.16±0.49	93±16	3.32±0.31	183±22
B, 80-120	2.14±0.39	38±4	7.97±0.58	160±19
$C_к$, 120-150	1.07±0.46	32±2	2.02±0.17	142±11

По сравнению с типичными черноземы выщелоченные характеризуются слабокислой реакцией среды в гумусово-аккумулятивных горизонтах, которая плавно переходит в слабощелочную к почвообразующей породе (горизонт С). Среди поглощенных оснований также преобладает кальций, доля обменного натрия составляет примерно 0.7% от ЕКО, при этом в пахотном и подпахотном горизонтах ЕКО составляет 43.0-47.4 смоль (экв.)/кг почвы. Засоление в профиле почвы также отсутствует (сухой остаток изменяется в пределах от 0.097 до 0.122%; табл. 1).

По содержанию гумуса в гумусово-аккумулятивном горизонте черноземы выщелоченные превышают значения чернозема типичного в среднем на 0.7%. Обеспеченность щелочно-гидролизуемым азотом высокая с учетом потребностей, как зерновых, так и кормовых и овощных культур. Обеспеченность подвижным фосфором – средняя, обменным калием – высокая (табл. 2).

Водно-физические свойства. Орошение почв, в том числе и черноземов, приводит к увеличению плотности и снижению водопроницаемости, что является следствием разрушения их структуры (Несват, 2011). В связи с чем возникает необходимость изучения и оценки для пригодности использования в орошаемом земледелии водно-физических свойств чернозема типичного и выщелоченного. В полевых условиях механический состав изученных почв определялся как тяжелосуглинистый. Аналитические исследования показали (табл. 3), что в профиле чернозема типичного содержание частиц размером <0.01 мм (физической глины) изменяется от 55 до 63%, а в почвообразующей породе достигает 64%. Такое количество физической глины указывает на тяжелый гранулометрический состав, пограничный между тяжелым суглинком и легкой глиной. Как известно, для черноземов типичных характерно отсутствие передвижения илистой фракции (<0.001 мм) в профиле. Однако в данном случае отмечается незначительное уменьшение ила в пахотном слое и его передвижение на глубину до 80 см в переходном горизонте АВ, что связано, по всей видимости, с орошением, которое проводилось на этом участке в 1981-1992 гг. В отличие от чернозема типичного, в профиле чернозема выщелоченного передвижение илистой фракции вниз по профилю более выражено. При этом во всех почвах преобладают фракции ила и крупной пыли, обогащенность илистыми частицами определяет формирование водопрочной структуры, а наличие крупной пыли при высоком залегании карбонатов способствует рыхлости профиля черноземов и высокой общей

пористости, которая составляет около 60% в гумусово-аккумулятивных горизонтах (табл. 4). Плотность пахотных слоев оценивается как рыхлая, твердость структурных отдельностей незначительна. В средней части профиля плотность составляет 1.04-1.20 г/см^3, что характеризует его сложение как оптимальное (Кирюшин, 1996).

Таблица 3. Гранулометрический состав черноземов по содержанию фракций в %.

Индекс горизонта, глубина в см	Гигроскопическая влага, %	Размер частиц, мм						Сумма частиц	
		1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	<0.01	>0.01
Чернозем типичный									
$А_{пах.}$, 0-28	5.28	1.22	5.55	33.41	9.39	16.75	33.68	59.62	40.18
А1, 28-58	4.87	1.12	4.88	31.45	8.24	17.66	36.65	62.55	37.45
АВ, 58-89	4.28	1.65	5.08	38.01	6.17	13.04	36.05	55.26	44.74
В, 89-118	4.16	0.74	5.58	31.27	16.91	13.29	32.21	62.41	37.59
С, 118-150	3.75	1.64	7.18	27.20	12.96	14.45	36.57	63.98	36.02
Чернозем выщелоченный									
Апах, 0-28	5.91	0.9	11.6	30.0	17.0	21.5	19.0	57.5	42.5
А1, 28-60	4.33	1.2	14.8	27.5	21.0	14.5	21.0	56.5	43.5
АВ, 60-80	4.87	1.0	17.0	17.5	21.5	16.5	26.5	64.5	35.5
В, 80-120	4.21	0.8	5.2	30.5	18.5	16.0	29.0	63.5	36.5
Ск, 120-150	4.04	1.7	10.8	24.8	7.9	17.0	38.8	63.7	37.3

Таблица 4. Водно-физические свойства черноземов.

Горизонт, глубина в см	Плотность, г/см^3		Твердость, кг/см^2	Почвенно-гидрологические константы, в % от массы почвы					
	сложения	твердой фазы		ГВ	МГ	ВЗ	НВ	КВ	ПВ
Чернозем типичный									
Апах, 0-28	1.01	2.57	1.81	5.28	9.11	12.2	46.0	52.2	56.7
А1, 28-58	1.04	2.61	2.69	4.87	8.76	11.7	40.9	48.6	51.64
АВ, 58-89	1.17	2.68	4.41	4.28	8.19	10.9	34.2	39.5	44.02
В, 89-118	1.43	2.71	11.69	4.16	8.22	11.0	26.0	27.3	30.16
Чернозем выщелоченный									
Апах, 0-28	1.00	2.59	1.82	5.91	8.50	11.3	42.7	43.0	52.80
А1, 28-60	1.04	2.61	2.20	4.33	8.42	11.2	37.8	39.3	50.60
АВ, 60-80	1.20	2.74	4.60	4.87	8.10	10.8	35.9	36.4	41.43
В, 80-120	1.45	2.72	16.50	4.21	7.92	10.6	26.1	28.4	31.40

Примечания к таблице 4: ГВ – гигроскопическая влажность, МГ – максимальная гигроскопическая влажность, ВЗ – влажность завядания, НВ − наименьшая влагоемкость, КВ − капиллярная влагоемкость, ПВ − полная влагоемкость

Чернозем типичный и выщелоченный обладают высокой влагоемкостью и водоудерживающей способностью, показатели наименьшей влагоемкости в профиле почв составляют 41-46 и 38-43 мм соответственно. Запасы продуктивной влаги в них, по данным А.Ф. Вадюниной и З.А. Корчагиной (1986), оцениваются как хорошие (табл. 4). Определение водопроницаемости в полевых условиях, показало, что коэффициент впитывания по классификации Н.А. Качинского (Теории …, 2007) для

тяжело- и среднесуглинистых почв для пахотного горизонта составил для чернозема типичного – 173, для чернозема выщелоченного – 221, что относится к категории «хорошая». На глубине 50 см значения коэффициента впитывания увеличиваются до 382 и 365 соответствуя категории «наилучшая» (рис.).

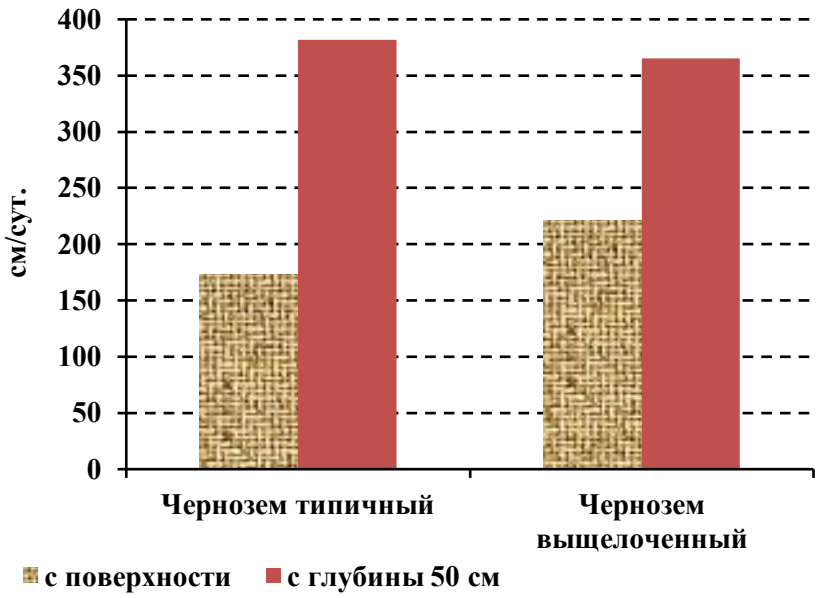

Рис. Коэффициент впитывания агрочерноземов.

Экологические свойства почв. Наряду с основными элементами питания, такими как азот, фосфор и калий, растения нуждаются и в определенном количестве микроэлементов. Но в условиях орошения, а также применения минеральных удобрений возникает опасность загрязнения почв тяжелыми металлами и увеличения токсичности микроэлементов (Rezapour et al., 2019). Анализ содержания микроэлементов (табл. 5) показал, что содержание кобальта в пахотном горизонте черноземов характеризуется как среднее и постепенно снижается с глубиной до низкого, содержание цинка – низкое, меди – среднее, марганца – низкое (Кирюшин, 1996), однако в почвообразующей породе отмечается увеличение содержания меди марганца, что, вероятно, связано с их повышенным содержание в подстилающих горных породах. В то же время содержание тяжелых металлов I класса токсичности (Pb, Cd) не превышает значения предельно допустимых концентраций (ПДК; табл. 5).

Таблица 5. Содержание тяжелых металлов и микроэлементов, мг/кг.

Индекс горизонта, глубина в см	Pb ПДК – 6.0	Cd ПДК – 2.0	Co	Zn	Cu	Mn
Чернозем типичный (среднее ± стандартное отклонение, n=8)						
$A_{пах.}$, 0-28	5.1±0.4	0.27±0.04	0.32±0.18	1.35±0.65	0.45±0.17	4.75±1.75
A_1, 28-58	2.2±0.7	0.12±0.02	0.17±0.05	0.51±0.20	0.33±0.06	2.01±0.44
AB, 58-89	2.6±0.4	0.10±0.03	0.16±0.07	0.45±0.02	0.34±0.04	1.71±0.19
B, 89-118	3.2±0.5	0.11±0.05	0.06±0.02	0.66±0.41	0.71±0.44	2.09±1.04
C, 118-150	2.8±0.3	0.13±0.02	0.22±0.05	1.20±0.14	1.73±0.23	31.37±10.73
Чернозем выщелоченный (среднее ± стандартное отклонение, n=8)						
$A_{пах.}$, 0-28	5.4±0.8	0.28±0.01	0.26±0.09	1.61±0.77	0.38±0.06	5.39±1.77
A_1, 28-60	2.4±0.9	0.14±0.03	0.18±0.08	0.62±0.24	0.31±0.07	4.84±1.11
AB, 60-80	2.7±0.3	0.11±0.02	0.17±0.06	0.52±0.26	0.33±0.05	2.41±0.27
B, 80-120	2.9±0.5	0.11±0.03	0.10±0.02	0.67±0.32	0.68±0.09	3.17±1.06
$C_к$, 120-150	2.7±0.4	0.12±0.02	0.23±0.07	1.21±0.17	1.68±0.34	35.48±9.52

Заключение

Проведенные исследования по мелиоративной оценке агрочернозёмов в целях их использования под орошение на участке, расположенном в пределах Предуральской южно-лесостепной зоны,

показали, что почвенный покров представлен черноземами типичными и выщелоченными. Их гумусово-аккумулятивные горизонты характеризуются высокой мощностью, порошисто-зернисто-комковатой структурой пахотных и зернисто-комковатой структурой подпахотных горизонтов.

Гумусово-аккумулятивные горизонты черноземов характеризуются слабокислой и нейтральной реакцией среды, которая с глубиной становится слабощелочной. Почвы насыщены основаниями, среди которых преобладает кальций, доля поглощенного натрия в составе почвенно-поглощающего комплекса незначительная, угроза осолонцевания отсутствует. Профили почв не засолены. По содержанию гумуса изученные почвы относятся к высокой категории, обеспеченность щелочногидролизуемым азотом – высокая, подвижным фосфором – средняя, обменным калием – высокая.

Черноземы характеризуются тяжелосуглинистым гранулометрическим составом, благоприятными водно-физическими свойствами, оптимальной плотностью сложения, высокой влагоемкостью и водоудерживающей способностью, хорошей водопроницаемостью с поверхности почвы и наилучшей с глубины 50 см.

Обеспеченность микроэлементами пахотных горизонтов по содержанию кобальта – средняя, цинка – низкая, меди – средняя, марганца – низкая. Содержание тяжелых металлов свинца и кадмия находится в пределах предельно допустимых концентраций.

По своим физико-химическим, агрохимическим и водно-физическим свойствам черноземы типичный и выщелоченный близки между собой и характеризуются высоким естественным плодородием и пригодны для использования в оросительной мелиорации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агрохимические методы исследования почв. 1976. М.: Наука. 656 с.

Апарин Б.Ф., Абакумов Е.В., Касаткина Г.А., Матинян Н.Н., Русаков А.В., Рюмин А.Г., Сухачева Е.Ю. 2012. Почвенное картирование: учебно-методическое пособие / Ред. Б.Ф. Апарин, Г.А. Касаткина. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета. 128 с.

Аринушкина Е.В. 1970. Руководство по химическому анализу почв М.: Изд-во Московского университета. 488 с.

Вадюнина А.Ф. 1986. Методы исследования физических свойств почв: учебное пособие по специальности «Агрохимия и почвоведение». 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат. 415 с.

Витковская С.Е. 2011. Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов. СПб: АФИ. 52 с.

Кирюшин В.И. 1996. Экологические основы земледелия: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Колос. 367 с.

Несват А.П. 2011. Влияние орошения на водно-физические свойства тёмно-каштановых почв // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. С. 57-58.

Почвы Башкортостана. 1995. Т. 1: Эколого-генетическая и агропроизводственная характеристика / Сост. Ф.Х. Хазиев, А.Х. Мукатанов, И.К. Хабиров, Г.А. Кольцова, И.М. Габбасова, Р.Я. Рамазанов. Ред. Ф.Х. Хазиев. Уфа: Гилем. 384 с.

Теории и методы физики почв. 2007 / Ред. Е.В. Шеин, Л.О. Карпачевский. М.: Гриф и К. 616 с.

Физико-географическое районирование Башкирской АССР. 1964 / Ред. И.П. Кадильников. Уфа. 210 с.

Хожанов Н.Н., Естаев К.А, Амангельди К. 2013. Оценка качества почвы при орошении сточными водами // Материалы Республиканской научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения – 9: новый вектор развития высшего образования и науки», посвященная дню Первого Президента Республики Казахстан. Т. 1. Ч. 2. С. 118-120.

Abd-Elwahed M.S. 2019. Effect of long-term wastewater irrigation on the quality of alluvial soil for agricultural sustainability // Annals of Agricultural Sciences. Vol. 64. Is. 2. P. 151-160.

Aydin M.E., Aydin S., Beduk F., Tor A., Tekinay A., Kolb M., Bahadir M. 2015. Effects of long-term irrigation with untreated municipal wastewater on soil properties and crop quality // Environmental Science and Pollution Research. No. 22. P. 19203-19212.

Elgallal M., Fletcher L., Evans B. 2016. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review // Agricultural Water Management. Vol. 177. P. 419-431.

Jahany M., Rezapour S. 2020. Assessment of the quality indices of soils irrigated with treated wastewater in a calcareous semi-arid environment // Ecological Indicators. Vol. 109. [Электронный ресурс https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105800 (дата обращения 01.11.2020)] .

Mendoza-Espinosa L.G., Cabello-Pasini A., Macias-Carranza V., Daessle-Heuser W., Orozco-Borbon M.V., Quintanilla-Montoya A.L. 2008. The effect of reclaimed wastewater on the quality and growth of grapevines //

Water Science and Technology. No. 57. P. 1445-1450.

Rezapour S., Atashpaz B., Moghaddam S.S., Damalas C.A., 2019. Heavy metal bioavailability and accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated with treated wastewater in calcareous soils // Science of the Total Environment. No. 656. P. 261-269.

Bedbabis S., Trigui D., Ben Ahmed C., Clodoveo M.L., Camposeo S., Vivaldi G.A., Ben Rouina B. 2015. Long-terms effects of irrigation with treated municipal wastewater on soil, yield and olive oil quality // Agricultural Water Management. Vol. 160. P. 14-21.

Wan Z., Chang A.C., Wu L., Crowley D. 2003. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland // Geoderma. No. 114. P. 261-278.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 90-97

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 631.4

КАРБОНАТЫ В ОРОШАЕМЫХ ПОЧВАХ ПРИКАСПИЙСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

© 2021 г. И.Н. Горохова*, И.Н. Чурсин**

**Почвенный институт им. В.В. Докучаева*
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2. E-mail: g-irina14@yandex.ru
***Научный геоинформационный центр РАН*
Россия, 119019, г. Москва, а/я 168, ул. Новый Арбат, д. 11. E-mail: chursin.ivan93@gmail.com

Поступила в редакцию 11.08.2020. После доработки 01.10.2020. Принята к публикации 01.12.2020

Представлено распределение и содержание карбонатов ($CaCO_3$) в верхних горизонтах орошаемых почв Прикаспийской низменности (район Сарпинской ложбины) на примере Дубоовражного орошаемого массива в Волгоградской области. На пике орошения в 85-90-х годах прошлого столетия на Дубоовражном массиве возделывали кормовые травы, полив осуществлялся дождеванием, уровень грунтовых вод оставался удовлетворительным, очаги вторичного засоления почв не отмечались. В настоящее время участок представляет собой частное фермерское хозяйство, где выращивают бахчевые и овощные культуры с использованием капельного орошения, уровень грунтовых вод остается удовлетворительным, вторичное засоление встречается в отдельных горизонтах почв. Выявлено, что часть полей на орошаемом массиве имеет пятнистый рисунок, который выделяется в полевых условиях и на космических снимках под озимыми зерновыми культурами. Установлено, что причина пятнистого изображения не связана с засолением почв, а вызвана разным содержанием карбонатов в поверхностном слое почвы. Совместное использование данных дистанционного зондирования и наземного полевого обследования, пересекающих ареалы с разной пятнистостью и спектральной яркостью на снимках, позволили определить почвы с разным содержанием карбонатов в пахотном горизонте почв, что крайне важно для их мелиорации и восстановлении.

Ключевые слова: пятнистость полей, космические снимки, содержание карбонатов в почвах.
DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10154

Волгоградская область является важным регионом орошаемого земледелия в России. Орошение на территории Волгоградской области началось еще в конце XIX века, но пик ирригационного освоения отмечался во второй половине XX века. После длительного периода прекращения орошения, связанного с экономической ситуацией 90-х годов прошлого века в стране, в Волгоградской области началась масштабная реконструкция оросительных систем, и поэтому крайне важно продолжить углубление знаний о закономерностях развития орошаемых почв для их полноценного восстановления.

Известно, что одной из особенностей почвообразования в аридных и семиаридных условиях является аккумуляция карбонатов кальция ($CaCO_3$). При содержании $CaCO_3$ до 10-15% считается, что они положительно влияют на свойства почв: способствуют образованию стабильных крупнопористых агрегатов, улучшают водно-физические свойства. При увеличении содержания $CaCO_3$ до 25% карбонаты могут осаждаться в крупных порах, снижая водопроницаемость почв. Однако даже небольшое содержание дисперсных карбонатов в почвах (>2-4%) ведет к образованию плотной корки после поливов, которая может быть непроницаемой для воды и препятствовать росту растений (Soil Survey ..., 1979).

Все пути поступления карбонатов в почвы условно можно разделить на две группы: 1) формирование карбонатов непосредственно в почве, 2) их поступление извне. В первом случае синтез карбонатов происходит в результате процесса выветривания содержащих кальций минералов. Такой процесс может протекать практически в любых климатических условиях. Однако в гумидных областях результат процесса может быть диагностирован только в почвенном растворе, а

твердофазный эффект карбонатизации (карбонатные новообразования) будет наблюдаться лишь в аридных условиях, где синтез сопряжен с аккумуляцией карбонатов (Розанов, 1992). Второй путь поступления карбонатов в почвы – перемещение продуктов выветривания карбонатных пород. В зависимости от способа переноса и климатических условий источниками карбонатов могут быть атмосферные осадки, пыль, грунтовые и поверхностные воды. Особая роль в регулировании поступления карбонатов в почвы и их дальнейшей динамике принадлежит растениям (Глазовская, 2002).

Впервые подробно процесс ирригационного окарбоначивания почв в сухостепной зоне России был выявлен В.А. Барановской и В.И. Азовцевым (1981). По результатам их исследований, за 40-летний период орошения произошло накопление массы карбонатов более чем в три раза в верхнем слое 0.5 м, причем происходило это независимо от глубины залегания грунтовых вод и при промыве легкорастворимых солей на значительную глубину. По мнению авторов, столь своеобразное поведение $CaCO_3$ в орошаемых почвах зависит от парциального давления CO_2 почвенного воздуха и его особенностей распределения по почвенному профилю. Своеобразный ритм миграции $CaCO_3$ в профиле обеспечивает ему устойчивость против выщелачивания. При этом авторы не исключают частичный привнос $CaCO_3$ с поливными водами (из р. Волги), хотя они являются пресными гидрокарбонатно-кальциевого состава.

L.S. Wu с соавторами (2008) также считает возможным поступление карбонатов в почвы вместе с поливной водой, проводя исследования в орошаемых сельскохозяйственных районах Калифорнии.

Для получения сведений о влияния орошения на динамику карбонатов в пахотном слое (0-20 см) сельскохозяйственных почв I.S. De Soto с соавторами (2017) провела эксперимент, включающий полевые наблюдения за количеством карбонатов и их распределением по гранулометрическим фракциям в нескольких ирригационных районах Испании. В результате эксперимента они выяснили, что при орошении в песчаной фракции почв поверхностных горизонтов количество карбонатов систематически уменьшается и стабилизировать их содержание удается только за счет внесения удобрений, а также за счет поступления из глубоких горизонтов почв во время вспашки.

Процесс подтягивания карбонатов в пахотных почвах сухостепной зоны России отмечался рядом российских исследователей (Сиземская, 2013; Любимова, Новикова, 2016). Считается, что значительное поступление карбонатного материала в почвы происходит в результате распашки и орошения земель, которые помимо положительного влияния создают многочисленные проблемы в сельскохозяйственном использовании земель.

Так, высокое содержание карбонатов в корнеобитаемом слое, свойственное каштановым почвам, карбонатным черноземам и особенно почвам, сформированным на продуктах выветривания известняков и мергелей, вызывает нарушение минерального питания виноградников, что выражается в заболевании их хлорозом (Петров, 2000). A. Larbi с соавторами (2019), напротив, отмечает положительное влияние карбонатов в почвах на произрастание оливковых растений в прибрежных средиземноморских засоленных землях.

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, типа использования земель и возделываемых культур, поэтому изучение карбонатных почв должно проводиться с учетом особенностей каждой территории. В данной работе это – орошаемые почвы сухостепной зоны Волгоградской области.

Орошаемые земли – это природно-техногенные системы. Одним из важнейших этапов создания оросительных систем, планировавшихся под использование поверхностных способов полива, являлась планировка (выравнивание) территории, способствовавшая равномерному растеканию ирригационной воды по полю и обеспечивавшая одинаковую мощность водного слоя в различных частях поля и равномерное освобождение последнего от воды. Этот антропогенный фактор воздействия на почвы при орошении чаще всего отсутствует при богарном использовании земель. Повышения микро- и мезорельефа срезают, а понижения заполняют материалом срезанных почв. Новые почвы коренным образом отличаются по строению и свойствам от исходных почв и во многих случаях представляют собой искусственные мозаичные почвы с особенно сложными профилями.

При проектировании оросительных систем в Волгоградской области в 1950-1960-х годах

предполагалось использовать поверхностные способы полива, поэтому практически везде была выполнена планировка полей. Значительная часть выпуклых элементов мезорельефа была срезана, в результате чего карбонатный горизонт почвенного профиля оказался расположенным ближе к поверхности.

Цель данного исследования – определить количество и распределение карбонатов ($CaCO_3$) в пахотном горизонте орошаемых почв сухостепной зоны Волгоградской области на примере Дубоовражного орошаемого массива и исследовать взаимосвязь распространения поверхностно-окарбоначенных почв с их спектральной отражательной способностью на космических изображениях.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являются орошаемые почвы Дубоовражного орошаемого массива, расположенного в Сарпинской ложбине Прикаспийской низменности (рис. 1).

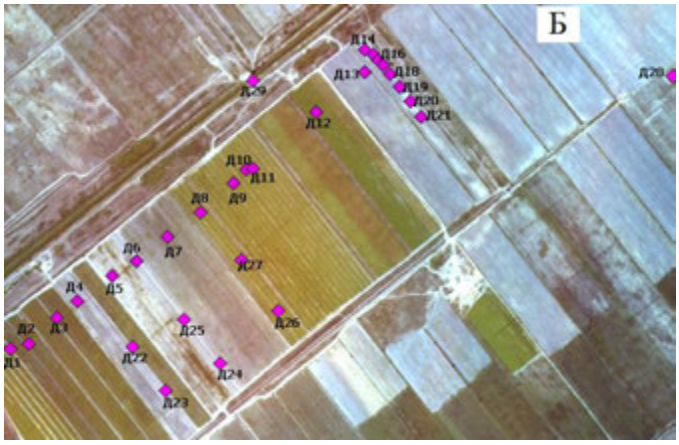

Рис. 1. Схема Дубоовражного орошаемого массива и точек опробования на разномасштабных космических снимках высокого разрешения: А) общий вид орошаемого массива и ключевого участка исследования; Б) точки опробования, заложенные на ключевом участке в 2018 г.

Сарпинская ложбина представляет собой древнюю долину Волги, которая веерообразно ветвясь, протягивается на десятки километров. В северной части ложбины (где расположен участок Дубоовражный) сохранилась цепь глубоких пресных озер и система периодически затопляемых лиманов. Ложбина врезана в засоленные морские (хвалынские) песчано-глинистые отложения, перекрытые суглинками аллювиально-морского генезиса. Грунтовые воды залегают на глубине 2.5-3 м. Минерализация пестрая, 3-10 г/л. Под озерными котловинами воды опресненные.

До строительства Волгоградского водохранилища на Волге ложбина ежегодно заливалась паводками, обводнявшими лиманы и озера. В настоящее время их обводнение поддерживается лишь необильным весенним стоком с Ергеней и частично местными талыми водами. Днище ложбины – это опустынивающаяся пойма. В северной части ее ландшафт характеризовался сочетанием усыхающих озер, окаймленных поясами тростниковых зарослей и в разной степени заболоченных лиманных солончаковых лугов с пышным злаковым и разнотравным покровом. Повышенные участки остепнены. В почвенном покрове преобладают солонцы солончаковые (>50%), светло-каштановые солонцеватые почвы, в понижениях – лугово-каштановые почвы и солончаки. Территория бессточная (Доскач, 1979).

Орошаемый участок Дубоовражный в 85-90-х годах прошлого века находился в удовлетворительных мелиоративных условиях, уровень грунтовых вод составлял преимущественно 3-5 м. Состав грунтовых вод достигал 3-5 г/л и был хлоридно-натриево-магниевого и хлоридно-

натриевого состава. Вторичное засоление почв не отмечалось. Остаточное солонцовое засоление в результате планировок поверхности полей при строительстве системы составляло 5% и 5-10%. Полив осуществлялся дождеванием, выращивали, в основном, кормовые травы (по данным Волгоградской гидрогеолого-мелиоративной партии; Горохова, 1992).

В настоящее время Дубоовражный представляет собой фермерское хозяйство. Здесь выращивают томаты, арбузы, морковь, тыкву, лук, горчицу и хлопчатник. Тип орошения – капельный. Преобладающие орошаемые почвы – светло-каштановые орошаемые (Классификация …, 1977) или агроземы светлые дисперсно-карбонатные, в некоторых случаях – карбонатно-аккумулятивные (Полевой …, 2008).

Полевые исследования проводились в августе 2018 г. Было заложено 29 скважин на глубину до 200 см, отобрано более 200 образцов, которые анализировались на токсичные соли, а часть – на содержание карбонатов (рис. 1). Содержание карбонатов определяли ацидометрически по Ф.И. Козловскому, с пересчетом CO_2 карбонатов в $CaCO_3$ (Руководство …, 1990).

Обработку космических материалов проводили в программе ENVI 5.1.

Результаты и обсуждение

В ходе многолетних исследований на примере орошаемых массивов Червленое и Светлоярский в сухостепной зоне Волгоградской области (в районах возвышенность Ергени и Сарпинская низменная равнина) исследовались различные варианты пятнистости орошаемых полей, отраженные на космических снимках, которые были увязаны с результатами полевых исследований. Было установлено, что пятнистость полей может формироваться при разной глубине залегания уровня грунтовых вод и по разным причинам, связанным, в частности, с проявлением вторичного засоления, солонцеватости, высокого содержания карбонатов в поверхностных горизонтах почв. Изучение орошаемых почв проводилось на полях с открытой поверхностью почвы и под кормовыми травами. Выявлено, что пятнистость может сопровождаться заметным снижением урожайности или выпадом сельскохозяйственной культуры (Горохова, Панкова, 2017; Горохова и др., 2019).

В данной работе приводятся результаты исследований на Дубоовражном орошаемом массиве, расположенном в другом природном районе Прикаспийской низменности (Сарпинская ложбина) и на полях под зерновыми культурами, где было установлено, что пятнистость полей не связана с засолением и солонцеватостью почв, а вызвана окарбоначиванием почв в пахотном горизонте. Такая пятнистость достаточно постоянна и не зависит от уровня грунтовых вод. Пятна хорошо проявляются на космических снимках и достигают размеров на поле от 250 до 1000 м^2.

Подтверждено, что на изучаемом массиве, так же, как и на предыдущих участках исследования, встречаются два варианта формирования карбонатного профиля. В первом из них вторичное окарбоначивание поверхностных горизонтов происходит за счет восходящего подтягивания почвенных растворов к поверхности в корнеобитаемый слой. Второй вариант окарбоначивания почв – срезка гумусового горизонта с последующей насыпкой смеси разных горизонтов во время производства планировки полей.

Как отмечалось выше, содержание карбонатов в верхних горизонтах почвы (0-20 см) может оказывать существенное влияние на всхожесть сельскохозяйственных культур из-за образования плотной корки, поэтому желательно знать их количество в пахотном слое. Обнаружив, что изображение орошаемых полей на космических снимках имеет пятнистый рисунок в виде чередования светлых и темных пятен, встала задача определить, в какой мере пятнистость связана с количеством $CaCO_3$ в верхних горизонтах почвы, увязав ее с полевыми данными.

По результатам полевых исследований и анализов почвенных образцов было установлено, что почвы более темных участков поля (и на снимке) характеризовались содержанием $CaCO_3$ в пределах от 0 до 3-4%. На светлых пятнах количество составляло около 4 и более 4%. Контраст по содержанию карбонатов между темными и светлыми полосами представлен 1.5-6-кратным увеличением показателя в пахотном слое светлой полосы (табл. 1).

Далее для почвенного картографирования поверхностно-окарбоначенных почв была проведена обработка изображения ключевого участка Дубоовражный на спектрозональном космическом снимке высокого разрешения Ресурс-П (май 2015 г.).

Первоначально для исследования возможностей распознавания по спутниковым изображениям

почв с разным количеством карбонатов, а также для подбора нужного алгоритма классификации космического снимка, рассматривалась информативность спектральных каналов мультиспектрального изображения. Были составлены диаграммы рассеяния яркости пикселей (0-255) поверхности почв в четырех каналах: Blue (B1), Green (B2), Red (B3), NIR (B4).

Таблица 1. Содержание карбонатов ($CaCO_3$, %) в верхнем слое почвы (0-20 см) в точках опробывания (2018 г.).

№	Номер точки опробования	Координаты точек		Изображение на снимке	Содержание $CaCO_3$, %
		Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.		
1	Д4	48.3407	44.6927	темное	2.38
2	Д5	48.3413	44.6940	темное	2.68
3	Д6	48.3417	44.6950	темное	0
4	Д7	48.3423	44.6961	темное	1.41
5	Д8	48.3429	44.6974	темное	0.9
6	Д12	48.3454	44.7002	темное	0.04
7	Д13	48.3464	44.7035	темное	0.22
8	Д14	48.3470	44.7036	светлое	4.16
9	Д15	48.3469	44.7039	светлое	3.74
10	Д16	48.3467	44.7040	темное	0.29
11	Д17	48.3466	44.7042	светлое	4.66
12	Д18	48.3464	44.7045	темное	1.38
13	Д19	48.3461	44.7048	темное	0
14	Д20	48.3457	44.7052	светлое	6.01
15	Д21	48.3453	44.7057	темное	0.26
16	Д24	48.3391	44.6981	темное	0.26
17	Д25	48.3402	44.6968	темное	0.40
18	Д26	48.3404	44.7003	темное	0.53
19	Д27	48.3417	44.6989	темное	0.31

На рисунке 2 представлена диаграмма рассеяния каналов (B1) и (B2), по которой видно, как распределились точки почв с разным количеством карбонатов по значениям яркости пикселей и относительно друг друга. По диаграмме можно определить следующее: с увеличением яркости отмечается увеличение содержания карбонатов в почвах; почвы с одинаковым количеством карбонатов группируются и такие группы имеют свои диапазоны яркостей, а значит, могут быть классифицированы.

Далее для классификации изображения были выбраны канал (B1) и алгоритм ISODATA, основанный на кластерном анализе. Данный алгоритм отвечает следующим существующим условиям: 1) объекты (кластеры, группы, классы) классифицируются на основе их различий без какой-либо точной предварительной информации о количестве и составе классов; 2) области значений яркости пикселей классов слабо пересекаются.

ISODATA (Iteretive Self-Organizing Data Analysis Technique – итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных) – алгоритм, основанный на статистическом кластерном анализе k-среднего (k-means). Задача кластерного анализа – выделение «сгущений» точек и разбиение совокупности на однородные подмножества объектов (кластеров, классов). К одному классу относятся пиксели, значения яркости которых наиболее близки в пространстве спектральных признаков. Производится расчет статистических параметров распределения яркостей выделенного фрагмента снимка (в нашем случае ключевого участка) в одной из спектральных зон. При этом каждый пиксель относится к тому классу, к центру (центроиду) которого он ближе всего. В качестве меры близости используется Евклидово расстояние.

Классификатор ISODATA осуществляет разделение по классам, используя максимальное, среднее и минимальное значения яркости и стандартное отклонение в первой итерации, затем

классификация проводится по средним значениям и минимальному евклидову расстоянию до получения оптимального разделения классов. Оценкой качества кластеризации выбран предел сходимости (convergence threshold) 95%, при котором процесс кластеризации заканчивается и количество пикселей, не поменявших свой класс между итерациями достигает 95%. Всего при обработке изображения ключевого участка на снимке было проведено 15 итераций с заданным количеством классов 4-7, максимальным стандартным отклонением от среднего 1 (в яркостных значениях, DN) и максимальной ошибкой расстояния 5 DN, что позволило провести статистически значимую кластеризацию и в результате выделить 4 класса изображений. Далее было определено, что поля с пятнистостью разделяются на 2 класса, которые соответствуют почвам, с разным количеством карбонатов в слое 0-20 см. Для первого класса почв характерно отсутствие карбонатов, присутствие следового или небольшого количества карбонатов в пахотном горизонте (0-4%), для второго класса почв характерно присутствие карбонатов в пахотном горизонте около 4 и >4%.

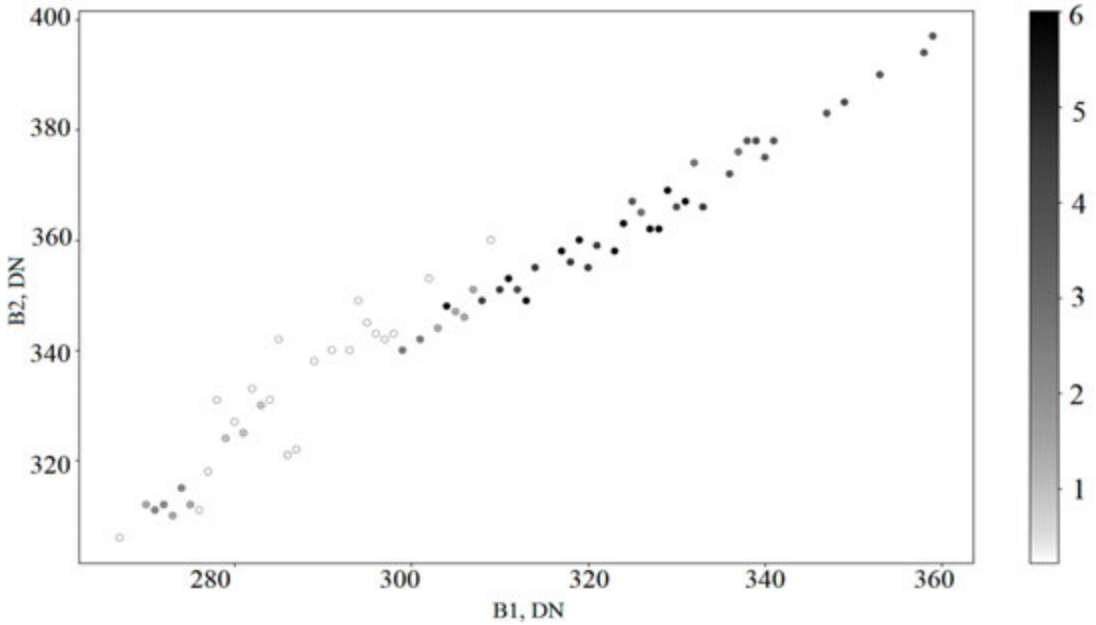

Рис. 2. Диаграмма рассеяния для каналов Blue (B1) и Green (B2) со спутника Ресурс-П.

На рисунке 3 представлены результаты обработки космического снимка со спутника Ресурс-П (май 2015 г.) в программе ENVI 5.1 классификатором ISODATA.

Таким образом, используя спутниковую информацию, возможно дистанционно определять участки с повышенным содержанием карбонатов в пахотном горизонте почв.

Если провести сравнение между всеми участками исследования по их расположению и другим параметрам пятнистости на полях, можно выделить следующие сходства и различия: все участки расположены в сухостепной зоне Волгоградской области, но занимают разные природные районы; на каждом из участков прослеживается пятнистость полей, связанная с окарбоначиванием почв с поверхности, но на некоторых из них (Червленое, Светлоярский) параллельно существует пятнистость, имеющая другую природу происхождения; для всех участков характерно два варианта формирования карбонатного профиля почв с поверхности; везде поверхностно-карбонатные почвы прослеживаются как светлые пятна в полевых условиях и на дистанционных материалах, которые идентифицируются на открытой поверхности почв, под кормовыми травами и озимыми культурами; граница образования светлых пятен проходит при значении $CaCO_3$ в почве около 4%; прослеживается некоторая связь между количеством карбонатов в почве и размером пятен (площадь пятен на Дубоовражном участке составляет от 250 до 1000 м^2 и количество $CaCO_3$ не превышает 4-6%, а на других участках, где площадь достигает 10-20 тыс. м^2, количество $CaCO_3$ составляет от 4 до 13%; табл. 2).

Такое сравнение показывает, что, несмотря на имеющиеся сходства, пятнистость орошаемых

почв исследуемых участков, отраженная в полевых условиях и на космических снимках, может иметь разный генезис, поэтому почвенное картографирование по дистанционным материалам требует обязательного предварительного изучения особенностей района исследований и обоснования причин появления пятнистости на основе полевых работ и лабораторных анализов почвенных образцов.

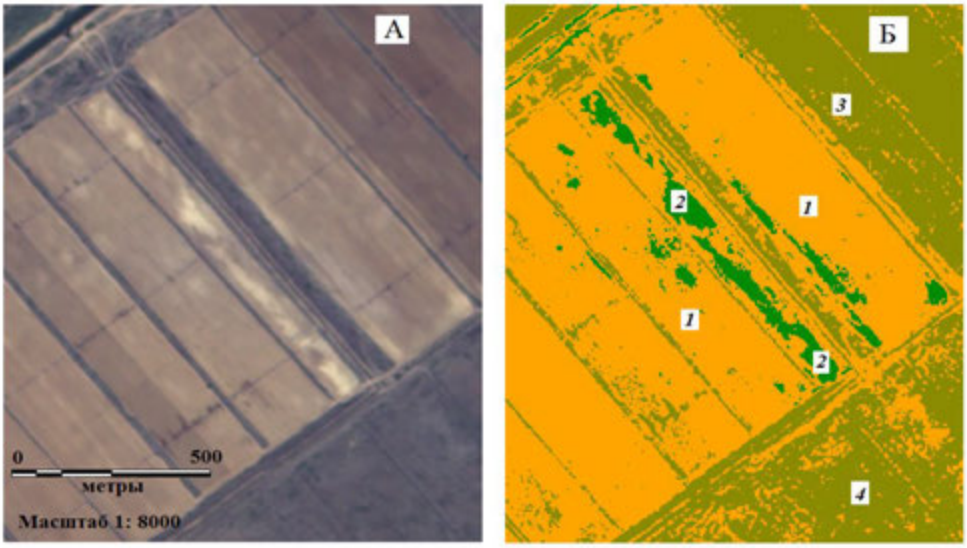

Рис. 3. Обработка космического снимка высокого разрешения Ресурс-П (май 2015 г.) в программе ENVI 5.1 классификатором ISODATA и выделение поверхностно окарбоначенных почв на ключевом участке Дубоовражный. *Условные обозначения:* А – космический снимок, Б – результат классификации снимка в канале Blue (B1) с полями под озимыми зерновыми культурами и с выделением почв по количеству $CaCO_3$ в слое 0-20 см; 1 – некарбонатные и карбонатные почвы (0-4%), 2 – карбонатные почвы с количеством $CaCO_3$>4%, 3 – пашня, 4 – залежь.

Таблица 2. Сравнение условий формирования и параметров пятнистости орошаемых почв на территории разных участков исследования (сухостепная зона Волгоградской области).

Орошаемый массив	Природный район	Возделываемая культура	Размер светлых пятен	Количество $CaCO_3$, %	Наличие пятен другой природы
Светлоярский	Прикаспийская низменность, Сарпинская низменная равнина	Люцерна	2-3 тыс. м^2	4-11.2	Солонцеватость
		Открытая поверхность почв	10-20 тыс. м^2	4-13.4	
Червленое	Северные склоны возвышенности Ергени	Открытая поверхность почв	10-20 тыс. м^2	4-13.2	Вторичное засоление, солонцеватость
Дубоовражный	Прикаспийская низменность, Сарпинская ложбина	Озимые зерновые	250-1000 м^2	4-6	

Заключение

В статье представлено количественное и пространственное распределение карбонатов ($CaCO_3$) в верхнем профиле орошаемых почв сухостепной зоны Волгоградской области, на примере Дубоовражного орошаемого массива (Прикаспийская низменность, район Сарпинской ложбины).

По результатам полевых и лабораторных исследований орошаемых почв на ключевом участке Дубоовражный определено, что ареалы с пятнистостью на полях не связаны с засолением и солонцеватостью почв, а обусловлены присутствием повышенного количества карбонатов в пахотном горизонте.

Установлено, что неоднородное изображение почв на космических снимках в виде чередующихся более темных и более светлых пятен, обусловлено разным содержанием карбонатов кальция в пахотном горизонте (0-20 см). Пятна хорошо проявляются на космических снимках полей, занятых озимыми зерновыми культурами.

При почвенном картографировании по результатам классификации космического снимка Ресурс-П (канал B1) на территории участка были выделены две группы почв по содержанию карбонатов: 0-4% и >4%.

Таким образом, используя спутниковую информацию, возможно дистанционно определять участки почв с повышенным содержанием карбонатов в пахотном горизонте почв, которые особо нуждаются в мелиоративных мероприятиях.

При сравнении всех участков исследования определено, что пятнистость может иметь разную природу, поэтому интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения особенностей района исследований и обоснования причин появления пятнистости на основе полевых работ и лабораторных анализов почвенных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барановская В.А, Азовцев В.И. 1981. Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // Почвоведение. № 10. С. 17-27.

Глазовская М.А. 2002. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена. 288 с.

Горохова И.Н. 1992. Оценка засоления орошаемых почв Нижнего Поволжья с использованием аэрофотоснимков. Автореф. дис. ... канд. техн. н. М. 25 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., Авдеева Т.Н., Панкова Е.И., Прокопьева К.О. 2019. Почвенно-агрохимическая характеристика Светлоярского орошаемого участка в Волгоградской области // Аридные экосистемы. Т. 25. № 1. С. 48-59. [*Gorokhova I.N., Avdeeva T.N., Pankova E.I., Prokopyeva K.O.* 2019. Soil and Agrochemical Characteristics of the Svetloyar Irrigated Site in Volgograd Oblast // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 1. P. 41-50.]

Доскач А.Г. 1979. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука. 142 с.

Классификация и диагностика почв СССР. 1977. М.: Колос. 223 с.

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 Solonetzic Soil Complexes in the Dry Steppe Zone under Anthropogenic Impacts // Eurasian Soil Science. Vol. 49. No. 5. P. 581-590.]

Сиземская М.Л. 2013. Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК. 276 с.

Петров Н.Н. 2000. Система закладки и возделывания виноградников на карбонатных почвах России. Авт. дисс. Новочеркасск. 60 с.

Полевой определитель почв России. 2008. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 182 с.

Розанов А.Б. 1992. Карбонатизация // Элементарные почвообразовательные процессы: опыт концептуального анализа, характеристика, систематика. М.: Наука. С. 23-25.

Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. 1990 / Ред. Н.Б. Хитров, А.А. Понизовский. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 236 с.

De Soto I.S., Virto I., Barre P., Fernandez-Ugalde O., Anton R., Martinez I., Chaduteau C., Enrique A., Bescansa P. 2017. A model for field-based evidences of the impact of irrigation on carbonates in the tilled layer of semi-arid Mediterranean soils // Geoderma. Vol. 297. P. 48-60.

Larbi A., Kchaou H., Gaaliche B., Gargouri K., Boulal H., Morales F. 2019. Supplementary potassium and calcium improves salt tolerance in olive plants // Scientia horticul turae. Vol. 260. [Электронный ресурс https://www.researchgate.net/publication/336512787_Supplementary_potassium_and_calcium_improves_salt_tolerance_in_olive_plants (дата обращения 14.07.2020)].

Soil Survey investigations for irrigation. 1979. FAO Soils Bulletin 42. Rome. 188 p.

Wu L.S., Wood Y., Jiang P.P., Li L., Pan G., Lu L.Q., Pan G.X., Lu J.H., Chang A.C., Enloe H.A. 2008. Carbon sequestration and dynamics of two irrigated agricultural soils in California // Soil science society of America journal. Vol. 72. P. 808-814.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 98-105

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 577.3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЮЧЕВОГО ФЕРМЕНТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ МАЛЫХ СУСЛИКОВ (*SPERMOPHILU SPYGMAEUS* PALL.) СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ[1]

© 2021 г. Р.А. Халилов, А.М. Джафарова, В.Р. Абдуллаев, Ш.А. Абакарова

Дагестанский государственный университет
Россия, 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 43а
E-mail: albina19764@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2019. После доработки 01.03.2020. Принята к публикации 01.12.2020

Значительные сезонные колебания температуры в аридных зонах Северо-Западного Дагестана определяют широкую заселенность их гетеротермными млекопитающими, обладающими уникальной способностью впадать при низких температурах окружающей среды в состояние гибернации. Существенные флуктуации физиологических и биохимических процессов в период гибернации и при выходе из неё предполагают наличие у гетеротермов гибких механизмов изменения функциональных характеристик ключевых метаболических ферментов. В данной работе проведено исследование температурной зависимости активности лактатдегидрогеназы (ЛДГ) скелетных мышц малых сусликов *Spermophilus pygmaeus* Pall. в период летнего бодрствования, глубокой гибернации и на различных этапах пробуждения, сопровождающихся разогревом тела животных до температур 10°С, 20°С, 30°С, 37°С. Обнаружено, что у гибернирующих сусликов активность ЛДГ, независимо от температуры её инкубации in vitro, существенно снижается. В динамике согревания происходит повышение активности ЛДГ, прогрессирующий характер которого наиболее выражен в диапазоне температур тела животных 1.6-20°С. Температурная зависимость активности ЛДГ в координатах Аррениуса аппроксимирована нелинейными графиками, позиция перегиба которых при спячке смещается в область низких температур, а после полного разогревания снова принимает контрольные значения. Гибернация способствует существенному повышению энергии и энтальпии активации ЛДГ. В динамике согревания уровни данных параметров непропорционально снижаются, достигая контрольных значений летних животных. Полученные данные свидетельствуют в пользу предположения о том, что в скелетных мышцах сусликов в период гибернации и на различных этапах пробуждения происходят существенные изменения в механизмах катализа фермента ЛДГ, имеющие адаптивно-приспособительный характер.

Ключевые слова: гибернация, пробуждение, суслики, мышцы, лактатдегидрогеназа, температурная зависимость, энергия активации, энтальпия активации.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10155

Степные экосистемы Северо-Западного Дагестана, локализованные в аридных зонах Прикаспия, подвержены значительным сезонным колебаниям температуры: от -24.3°С зимой до 40.4°С летом (Гасанов и др., 2013). Это определяет широкое заселение их мелкими млекопитающими, обладающими уникальной стратегией температурной адаптации, называемой гетеротермией. Особенность гетеротермии заключается в том, что при низких температурах окружающей среды и в условиях дефицита пищевых ресурсов, гетеротермные животные впадают в торпидное состояние, часто называемое гибернацией (зимней спячкой).

Зимняя спячка характеризуется значительным снижением скорости метаболизма и температуры тела (до 1-1.5°С), подавлением целого ряда физиологических функций, таких как сердечный выброс, частота дыхания и сердечных сокращений, периферической вазокострикцией (Geiser, 2004; Jørgensen

[1] Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Госзадания FZNZ-2020-0002 «Разработка и оптимизация технологий получения инновационных функциональных материалов».

et al., 2014). При этом биохимические процессы, работа органов и систем организма гибернирующих животных перестраиваются так, что даже при очень низкой температуре тела поддерживается определенный гомеостаз (Storey, Storey, 2004).

Гибернация длится несколько месяцев и сопровождается периодическими пробуждениями, в ходе которых животные разогреваются в течение 1.5-2.5 часов до нормотермии, при этом за короткий период биохимические и физиологические параметры организма возвращаются к эутермному уровню (Carey et al., 2003). Столь существенные изменения физиологического состояния животного требуют гибких механизмов адаптации к температуре гликолитических ферментов, ключевым из которых является L-лактат: НАД-оксидоредуктаза (1.1.1.27, лактатдегидрогеназа – ЛДГ). Особый интерес представляют изменение активности ЛДГ в мышцах, поскольку при охлаждении тела именно они первыми начинают терять тепло. Мышцы играют важную роль в продукции тепла при выходе гетеротермного животного из состояния торпидности (Carey et al., 2003). Таким образом, для успешной гибернации необходимы адаптивные изменения отдельных клеточных функций в скелетных мышцах.

В данной работе нами проведено исследование функциональных характеристик (активности, энтальпии активации, энергии активации) ЛДГ скелетных мышц сусликов при различных температурах тела, соответствующих следующим физиологическим состояниям: летнему бодрствованию, глубокой гибернации (середина баута) и индуцированному согреванию. Результаты исследования могут стать важным шагом в раскрытии молекулярных механизмов компенсаторно-приспособительных реакций ферментов животных с резистентной стратегией адаптации при низких температурах тела.

Материалы и методы

Объекты исследования. Исследования были выполнены на малых сусликах *Spermophilus pygmaeus Pall.* с массой тела животных 250-300 г, отловленных в Буйнакском районе Республики Дагестан (42° 55' с.ш., 47° 20' в.д.; 320 м н.у.м. БС) и содержащихся в стандартных условиях вивария. При выполнении настоящего исследования были соблюдены все нормы и правила проведения экспериментальных работ с использованием лабораторных животных (Директива 2010/63/EU Совета Европейского Сообщества по защите животных, используемых в экспериментальных и других научных целях).

Моделирование зимней спячки и пробуждения. Животные были распределены на 6 групп. Первую группу составляли бодрствующие в летний период животные (контроль), вторую – животные, находящиеся в состоянии глубокой зимней спячки, третью–шестую – животные, находящиеся на различных этапах индуцированного пробуждения. Для индукции зимней спячки в конце октября сусликов переносили в темное помещение с температурой 2-5°С. Через несколько дней животные впадали в спячку с понижением температуры тела (t_T) примерно до 1.6±0.4°С. После 1 месяца гибернации средняя длительность баута составляла 14 сут. Для экспериментов животных брали в торпидном состоянии в середине баута. Для запуска процесса пробуждения животных переносили в помещение с температурой 20°С. По достижении t_T 10°С, 20°С, 30°С, 37°С животных использовали в эксперименте.

Получение безмитохондриального цитозоля. Животных декапитировали, выделяли икроножные мышцы. Навеску ткани гомогенизировали в 0.1 М фосфатном буфере (pH=7.4). Гомогенат центрифугировали при 600 g (10 мин). Полученный супернатант повторно центрифугировали при 15000 g в течение 10 мин.

Определение активности ЛДГ. Активность ЛДГ определяли спектрофотометрически, по убыли содержания $НАДН_2$[2] (λ=340 нм) в реакционной среде (Халилов и др., 2018). Исследование активности ЛДГ проводили в диапазоне температурах инкубации 5-37°С (при концентрации пирувата в среде инкубации 0.3 ммоль). По полученным результатам вычисляли активность фермента, строили линейные анаморфозы в координатах Аррениуса, по которым определяли энергии активации.

Статистическая обработка результатов. Обработка данных произведена с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием пакета Statistica 8.0. Достоверность

[2] $НАДН_2$ – никотинамидадениндинуклеотид восстановленный – кофермент пиридинзависимых дегидрогеназ, к которым относится ЛДГ.

различия определяли с помощью критерия Фишера на уровне значимости P=0.05. Каждая кривая на графиках температурной зависимости активности ЛДГ построена по средним значениям 8 независимых экспериментов. Данные в таблице приведены в виде: среднее ± ошибка среднего.

Результаты и обсуждение

Исследована активность ЛДГ в скелетных мышцах сусликов в период летнего бодрствования, глубокой гибернации и на различных этапах пробуждения, сопровождающихся разогревом тела животных до температур 10°C, 20°C, 30°C, 37°C. Из рисунка 1 видно, что у сусликов, находящихся в состоянии торпидности, наблюдается существенное снижение активности ЛДГ, составляющее относительно контроля 75%.

Таблица. Термодинамические параметры ЛДГ скелетных мышц сусликов при зимней спячке и в динамике индуцированного согревания.

Состояние животного	Ea_1, кДж/моль·°К	Ea_2, кДж/моль·°К	ΔH_1, кДж	ΔH_2, кДж
Контроль	5.14±0.47	22.52±1.52	2.67±0.27	20.01±1.35
Глубокая спячка	6.88±0.52*	35.93±2.63*	4.41±0.33*	33.65±2.46*
Согревание, $t_т$ 10°C	6.30±0.72	28.66±2.90	3.83±0.43	26.25±2.25
Согревание, $t_т$ 20°C	7.07±0.69*	24.32±1.73#	4.60±0.44*	21.89±1.55#
Согревание, $t_т$ 30°C	6.37±0.38	22.58±1.94#	3.90±0.23	20.07±1.72#
Согревание, $t_т$ 37°C	4.58±0.36#	22.93±2.00#	2.11±0.16#	20.35±7.77#

Примечания к таблице. Достоверные отличия: * – относительно контроля, # – относительно спячки.

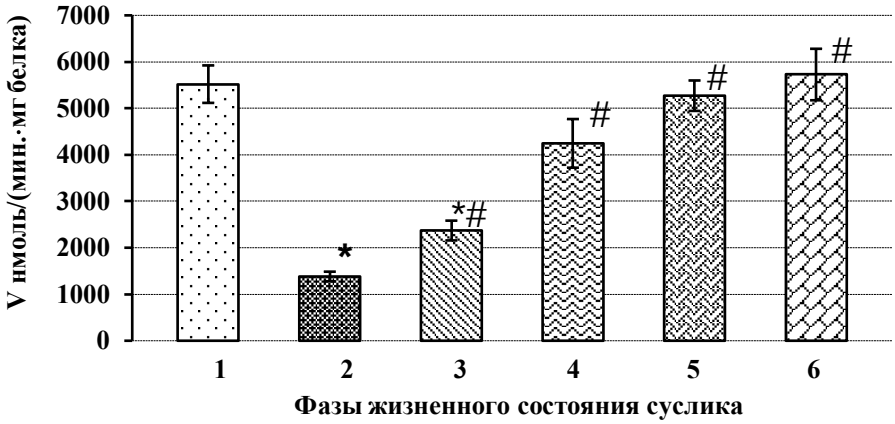

Рис. 1. Активность ЛДГ в скелетных мышцах сусликов в период летнего бодрствования (1), глубокой гибернации (2) и согревания до t_T 10°C (3), 20°C (4), 30°C (5), 37°C (6). *Условные обозначения.* Достоверные отличия: * – относительно контроля, # – относительно спячки.

Согревание животных до 10°C приводит к значительному (на 71.4%) повышению активности ЛДГ относительно спячки. При температуре тела 20°C скорость катализа ЛДГ становится выше таковой спячки в 3.1 раз, при 30°C – в 3.8 раз, а 37°C – в 4.1 раз. Следует отметить, что активность ЛДГ in vitro[3] была определена при температурах инкубации примерно соответствующих температуре тела сусликов. Поэтому рисунок 1 максимально отображает реальную функциональную активность фермента в условиях in vivo.

[3] In vitro (с лат. – «в стекле») – это технология выполнения экспериментов, когда опыты проводятся «в пробирке» – вне живого организма. В общем смысле этот термин противопоставляется термину in vivo – эксперимент на живом организме – на человеке или на животной модели (прим. ред.).

Возникает вопрос – обнаруженные эффекты гибернации и согревания на активность ЛДГ обусловлены непосредственным влиянием температуры на фермент или же регулируемыми изменениями его физико-химических свойств в цикле гибернации?

Для того чтобы выяснить этиологию изменений активности фермента у гибернантов, необходимым представляется исследование зависимости активности ЛДГ от температуры тела животного, проведенное in vitro при разных температурах инкубации фермента. Из рисунка 2 видно, что почти при всех температурах инкубации ЛДГ наблюдается значительное снижение активности ЛДГ у гибернирующих животных и прогрессирующее повышение её в динамике согревания животного до эутермического состояния. Отсюда следует, пертурбации активности ЛДГ при спячке и пробуждении обусловлены не прямым воздействием температуры на ЛДГ, сопровождающимся изменением баланса ван-дер-ваальсовых сил в молекуле фермента, а какими-то адаптивно-приспособительными изменениями на уровне фермента, позволяющими регулировать его активность в зависимость от физиологического состояния животного и температуры его тела.

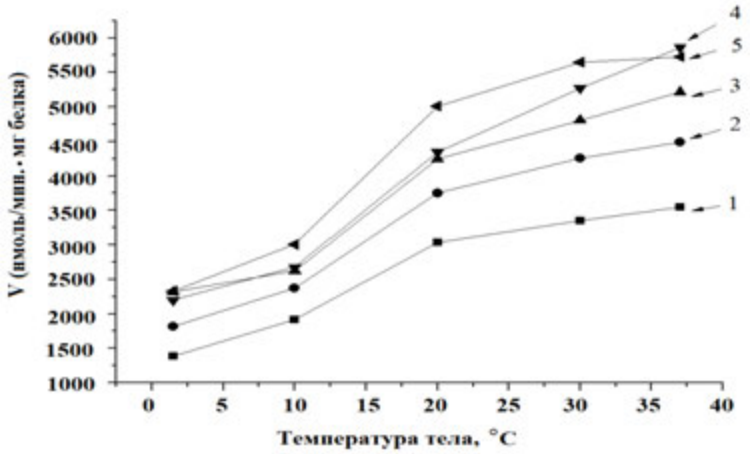

Рис. 2. Зависимость активности ЛДГ скелетных мышц от t_T сусликов при различных температуры инкубации фермента in vitro. *Условные обозначения:* 1 – 5°С, 2 – 10°С, 3 – 20°С, 4 – 30°С, 5 – 37°С.

Интересно то, что графики зависимости активности ЛДГ от температуры тела животного имеют нелинейный характер, что обусловлено неравнозначными повышениями эффективности катализа фермента в диапазоне t_T 1.6-20°С (более резкое и выраженное повышение) и 20-37°С (медленное и несущественное повышение). Таким образом, при достижении t_T 20°С в механизмах функционирования ЛДГ происходят резкие изменения, способствующие стабилизации активности ЛДГ на определенном, близком к нормотермии, уровне.

Для того чтобы более детально исследовать механизмы изменения активности ЛДГ в цикле гибернации, нами исследованы термодинамические параметры фермента, вычисленные путем анализа линейных анаморфозов температурной зависимости в координатах Аррениуса (рис. 3). Почти при всех исследованных состояниях температурная зависимость фермента аппроксимирована нелинейными графиками, а именно двумя прямыми пересекающимися при определенных температурах. Наличие изломов на графиках температурной зависимости активности цитозольного фермента может быть обусловлено тем, что в очень узком температурном диапазоне реализуется одно из двух предполагаемых событий: триггерно изменяется конформация самого фермента, или происходит фазовый переход в фиксирующей его подложке. Известно, что гликолитические ферменты в мышцах образуют надмолекулярный комплекс, объединяющей якорной субъединицей которого служит F-актин (Menard et al., 2014). Такая интеграция гликолитических ферментов позволяет не только быстро туннелировать субстрату, но и осуществлять регуляцию гликолитического потока (Puchulu-Campanella et al., 2013). Интересно то, что ранние исследования температурной зависимости ЛДГ гомойтермных животных показали, что она, в отличие от таковой гетеротермных животных, носит линейный характер (Халилов и др., 2018). Структура ЛДГ, как и многих компонентов гликолитического метаболона, достаточно консервативна в эволюционном отношении, поэтому обнаруженная нами особенность температурной зависимости ЛДГ у гетеротермов вряд ли связана с глубокими изменениями структурной организации фермента, или его

якорной подложки. Остается предположить только лишь какую-либо химическую модификацию ЛДГ, позволяющую резко изменить чувствительность его к температуре.

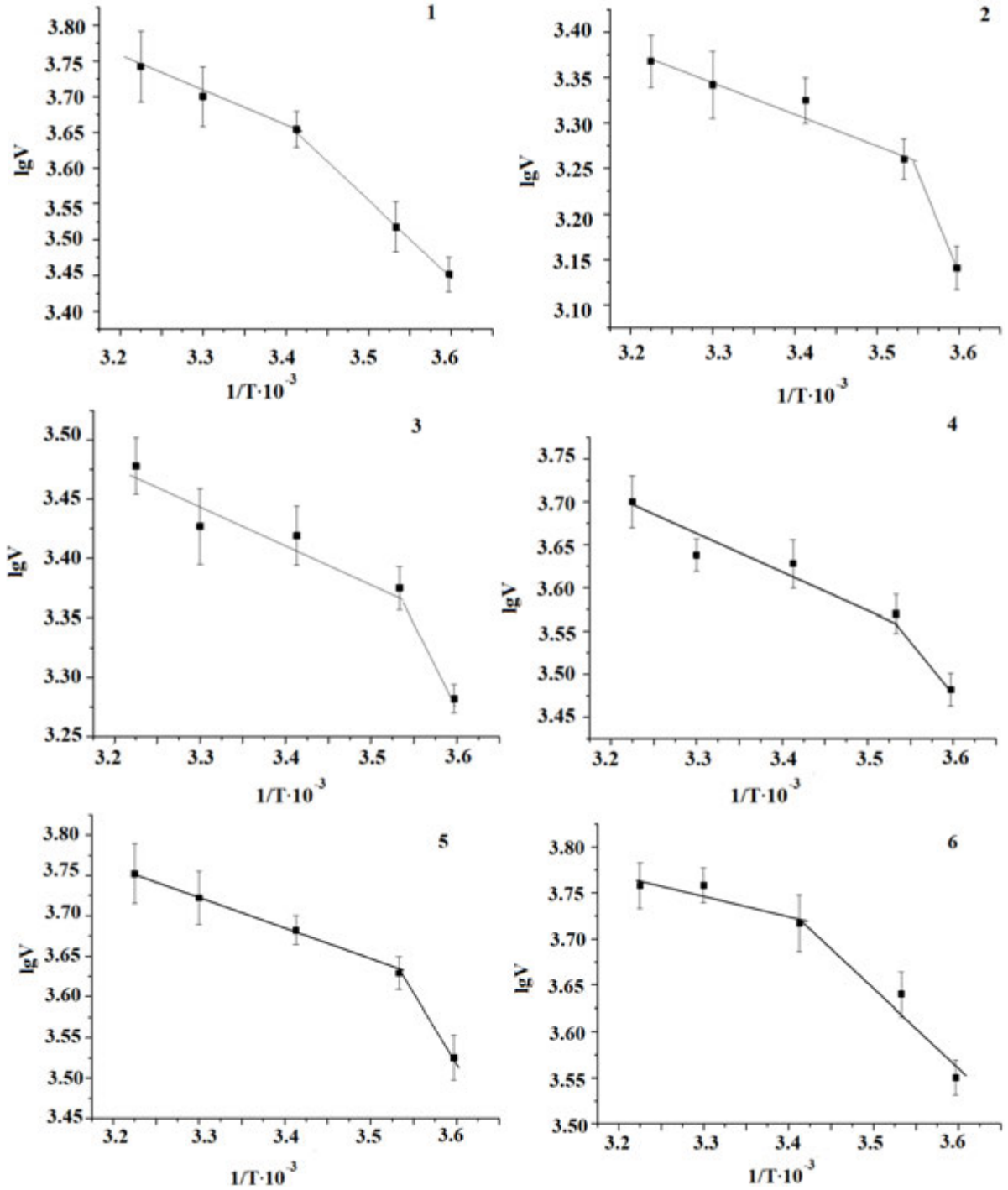

Рис. 3. Температурная зависимость активности ЛДГ скелетных мышц сусликов при зимней спячке и в динамике индуцированного согревания. *Условные обозначения*: 1 − контроль, 2 – спячка, 3 – согревание до 10°С, 4 – согревание до 20°С, 5 – согревание до 30°С, 6 – согревание до 37°С.

Очевиден тот факт, что в состоянии торпидности происходит смещение точки излома на графике в сторону более низких температур. Так, например, в контроле точка температурного перехода примерно равна 20°С, а в состоянии торпидности – 10°С. Согревание животных не оказывает значительного влияния на позицию точки перегиба графиков Аррениуса. Однако при полном

разогреве сусликов (до t_T 37°C) наблюдается смещение точки излома к таковой у контрольных животных. Таким образом, из графиков видно, что при зимней спячке и в динамике согревания наблюдается изменение активности фермента и смещение точки перегиба. Кроме того, изменяются и наклоны кривых, из тангенса угла которых вычислены соответствующие эффективные энергии и энтальпия активации.

Из данных, представленных в таблице, видно, что энергия активации ниже точки излома (Ea_2) в состоянии глубокого оцепенения значительно увеличивается (на 59.6%) по сравнению с контролем. Согревание животных до 10°C сопровождается незначительным (на 21%) снижением Ea_2 по сравнению со спящими животными. Повышение температуры тела торпидных животных до 20°C приводит к тому, что значение Ea_2 для ЛДГ достоверно снижаются, достигая при полном разогреве уровней летних бодрствующих сусликов. Что касается энергии активации выше точки излома (Ea_1), то она также при спячке увеличивается, а после полного разогрева тела гетеротермов – снижается до уровня контроля. Однако амплитуда колебаний Ea_1 менее выражена по сравнению с Ea_2.

Эффективные энтальпии активации рассчитаются из значений энергии активации по формуле: $\Delta H=\Delta E_a-RT$. Поэтому изменения данного термодинамического параметра в цикле гибернации имеют такой же характер, что и энергия активации.

Таким образом, в диапазоне температур инкубации 10-20°C имеет место резкая смена многих термодинамических параметров ЛДГ. Причем у нормотермических животных критической температурой является 20°C, а у спящих и находящихся на различных этапах согревания – 10°C. Это свидетельствует о том, что химическая модификация фермента, приводящая к резкому изменению его термодинамических параметров, носит обратимый характер.

Имеют ли обнаруженные нами изменения активности и температурной зависимости ЛДГ при гибернации и пробуждении биологический смысл, и чем они могут быть обусловлены? Зимняя спячка – это эволюционно сложившееся приспособление, позволяющее свести к минимуму все энергозатраты организма. Множество исследований указывают на очень низкий уровень окислительного метаболизма в тканях гибернантов в состоянии торпидности (Ruf et al., 2012). Спячка характеризуется регулируемым подавлением энергетически «дорогостоящих» процессов (транскрипции, трансляции, активного транспорта) и реорганизацией топливного метаболизма с углеводного на липидный (Wang, Lee, 2011). В работе K.L. Vermillion с соавторами (2015) было показано, что уровни экспрессии гликолитических ферментов в скелетных мышцах гетеротермов при зимней спячке снижается. Это хорошо коррелирует с данными протеомного анализа, которые демонстрируют низкие уровни гликолитических белков в мышцах спящих тринадцатиполосных сусликов (Anderson et al., 2016). Вклад протеосомной деградации в снижении содержания ЛДГ при спячке ничтожно мал, поскольку в период оцепенения происходит её регулируемое подавление, позволяющее ограничить потерю мышечной массы в состоянии торпидности (Cotton, 2016).

Таким образом, обнаруженное нами подавление активности ЛДГ при спячке, в первую очередь, может быть связано со снижением её концентрации в клетках, что позволяет уменьшить число оборотов гликолиза и тем самым экономно расходовать запасы гликогена в мышцах. Однако наши данные демонстрируют, что для ЛДГ спящих животных характерны высокие значения энергии и энтальпии активации. Эти термодинамические параметры фермента не зависят от уровня экспрессии, а определяются особенностями протекания самого каталитического процесса, определяемого пространственной конфигурацией фермента, его конформационной лабильностью. Изменение этих структурно-функциональных свойств фермента, к примеру, может быть обусловлено экспрессией различных молекулярных форм ЛДГ в цикле гибернации, каждая из которых отличается термодинамическими параметрами. Однако высокие энергетические затраты, связанные с созданием новых белков, делают дифференциальную экспрессию генов различных субъединиц ЛДГ маловероятным событием. Поэтому различия в активности и температурной зависимости между ЛДГ бодрствующих и спящих животных, скорее всего, связаны с обратимой посттрансляционной модификацией белка.

В качестве наиболее вероятного механизма химической модификации ЛДГ представляется её фосфорилирование. Было установлено, что дифференцированное фосфорилирование ЛДГ у различных пойкилотермных видов животных, впадающих в гипометаболическое состояние, приводит к снижению активности фермента (Xiong, Storey, 2012; Katzenback et al., 2014). Вестерн-блот-анализ с

использованием специфических антител к фосфосерину и фосфотреонину показал, что ЛДГ торпидных гетеротермных животных значительно больше фосфорилирована по серину и треонину по сравнению с летними бодрствующими животными (Ruberto, 2015). Потенциальным кандидатом на роль фермента, ответственного за фосфорилирование ЛДГ, может выступать АМФ[4]-зависимая протеинкиназа (AMPK). AMPK является киназой, которая очень чувствительна к отношению [АМФ] к [ATP[5]] и характеризуется как энергетический датчик энергии. Было обнаружено, что у гибернирующих бурундуков активность AMPK повышается (Yamada et al., 2019), что, вероятно, связано со снижением в период торпидности уровня АТФ в клетках.

В период межбаутных пробуждений сусликов происходит активация метаболизма, сопровождающаяся повышением температуры тела. Интенсифицируются многие физиологические процессы: сердцебиение, дыхание, кровообращение и т.д. В динамике пробуждения t_T поднимается изначально за счет недрожательного термогенеза в бурой жировой ткани, а затем за счет дрожи скелетных мышц, которая начинается после того, как t_T достигает ~20°C. Высокие темпы термогенеза продолжаются до тех пор, пока животное не достигнет нормотермии, при этом многие субстраты мобилизуются для выработки энергии (Carey et al., 2003), а липидный обмен переключается на углеводный. (Karpovich et al., 2009). Интенсивное сокращение скелетной мускулатуры, где скорость кровотока еще не полностью восстановилась, может способствовать развитию в этих тканях ситуации гипоксии. Следовательно, высокая активность ЛДГ в мышцах позволит увеличить число оборотов анаэробного гликолиза и тем самым сыграть ключевую роль в энергообеспечении их сократительной деятельности. Интересно, что температура индукции интенсивной мышечной дрожи у гетеротермов соответствует температуре излома графиков зависимости активности ЛДГ от температуры тела гетеротермов (рис. 2). Это указывает на ведущую роль ЛДГ в регуляции дрожательного термогенеза, от интенсивности которого зависят скорости биохимических и физиологических процессов.

Согревание животного до нормотермии происходит достаточно быстрыми темпами (за 1.5-2.5 часа). Значительное повышение активности ЛДГ, обнаруженное нами уже на ранних этапах разогревания (t_T 10°C), когда скорости энергозатратных процессов – транскрипции и трансляции – все еще не достигают уровней эутермных животных, вряд ли связано с повышенной экспрессией этого фермента. Тем более что обнаруженное снижение значений термодинамических параметров фермента свидетельствуют о его структурно-функциональных трансформациях. Скорее всего, повышение эффективности катализа фермента на начальных этапах пробуждения связано с противоположным фосфорилированию процессом – дефосфорилированием, в котором участвуют специфические протеинфосфатазы.

Таким образом, полученные нами экспериментальные данные об активности и температурной зависимости активности ЛДГ при спячке и в динамике пробуждения свидетельствуют в пользу предположения о том, что в цикле гибернации в скелетных мышцах сусликов происходит регулируемое репрограммирование метаболизма, в основе которого, возможно, лежат посттрансляционные модификации этого ключевого фермента гликолитического пути катаболизма углеводов. Возможно, термодинамические параметры ЛДГ являются точкой приложения регуляторных сигналов, направленных на переключение метаболизма с анаэробного (при недостаточной перфузии мышц) на аэробный, с углеводного на липидный и наоборот.

Выводы

1. Во время гибернации активность ЛДГ в скелетных мышцах сусликов существенно снижается. В динамике согревания происходит прогрессирующее повышение активности ЛДГ, имеющее более выраженный характер в диапазоне температур тела животных 1.6-20°C.

2. Температурная зависимость активности ЛДГ скелетных мышц сусликов в координатах

---

[4] АМФ – аденозинмонофосфáт или адениловая кислота – нуклеозидмонофосфат. В организме содержится в составе рибонуклеиновой кислоты, коферментов и в свободном виде. Предшественник АДФ и АТФ.

[5] ATP – Аденозинтрифосфáт или Аденозинтрифосфорная кислота (сокр. АТФ, англ. ATP) – нуклеозидтрифосфат, имеющий большое значение в обмене энергии и веществ в организмах. АТФ – универсальный источник энергии для множества биохимических и физиологических процессов, протекающих в биосистемах.

Аррениуса аппроксимирована нелинейными графиками, позиция перегиба которых при спячке смещается в область низких температур, а после полного разогревания снова принимает значения летних бодрствующих животных

3. Гибернация способствует существенному повышению энергии и энтальпии активации ЛДГ. В динамике согревания уровни данных параметров непропорционально снижаются, достигая значений летних бодрствующих животных

4. В скелетных мышцах сусликов в период гибернации и на различных этапах пробуждения происходят существенные изменения активности и механизмов катализа ЛДГ, носящие адаптивно-приспособительный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гасанов Г.Н., Асварова Т.А., Гаджиев К.М., Абдулаева А.С., Салихов Ш.К., Баширов Р.Р. 2013. Динамика климатических условий Терско-Кумской низменности Прикаспия за последние 120 лет // Юг России: экология, развитие. Т. 8. № 4. С. 96-104.

Халилов Р.А., Джафарова А.М., Хизриева С.И., Абдуллаев В.Р. 2018. Кинетические и термодинамические характеристики лактатдегидрогеназы скелетных мышц крыс гомой- и гетеротермных животных при низких температурах тела // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. Т. 54. № 6. С. 425-432.

Anderson K.J., Vermillion K.L., Jagtap P., Johnson J.E., Griffin T.J, Andrews M.T. 2016. Proteogenomic analysis of a hibernating mammal indicates contribution of skeletal muscle physiology to the hibernation phenotype // Journal of Proteome Research. Vol. 15. P. 1253-1261.

Carey H.V., Andrews M.T., Martin S.L. 2003. Mammalian hibernation: cellular and molecular responses to depressed metabolism and low temperature // Physiological Reviews. Vol. 83. P. 1153-1181.

Cotton C.J. 2016. Skeletal muscle mass and composition during mammalian hibernation // Journal of Experimental Biology. Vol. 219. P. 226-234.

Geiser F. 2004. Metabolic rate and body temperature reduction during hibernation and daily torpor // Annual Review of Physiology. Vol. 66. P. 239-274.

Jørgensen P.G., Arnemo J., Swenson J.E. 2014. Low cardiac output as physiological phenomenon in hibernating, free-ranging Scandinavian brown bears (Ursus arctos) − an observational study // Cardiovascular Ultrasound. Vol. 12. [Электронный ресурс https://cardiovascularultrasound.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-7120-12-36/ (дата обращения 03.12.2019)].

Karpovich S.A., Tøien, Ø., Buck, C.L., Barnes B.M. 2009. Energetics of arousal episodes in hibernating arctic ground squirrels // Journal of Comparative Physiology B. Vol. 179. No. 6. P. 691-700.

Katzenback B.A., Dawson N.J., Storey K.B. 2014. Purification and characterization of a urea sensitive lactate dehydrogenase from the liver of the African clawed frog *Xenopus laevis* // Journal of Comparative Physiology B. Vol. 184. No. 5. P. 601-611.

Menard L., Maughan D., Vigoreaux J. 2014. The Structural and Functional Coordination of Glycolytic Enzymes in Muscle: Evidence of a Metabolon? // Biology. Vol. 3. P. 623-644.

Puchulu-Campanella E., Chu H., Anstee D.J., Galan J.A., Tao W.A., Low P.S. 2013. Identification of the components of a glycolytic enzyme metabolon on the human red blood cell membrane. // Journal of Biological Chemistry. Vol. 288. P. 848-858.

Ruberto A.A. 2015. Regulation of lactate dehydrogenase and glycerol-3-phosphate dehydrogenase in mammalian hibernation. Ottawa: Carleton University. 136 p.

Ruf T., Bieber C., Arnold W., Millesi E. 2012. Living in a Seasonal World / Heidelberg New York: Springer. 563 p.

Storey K.B., Storey J.M. 2004. Metabolic rate depression in animals: transcriptional and translational controls // Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society. Vol. 79. P. 207-233.

Vermillion K.L., Anderson K.J., Hampton M., Andrews M.T. 2015. Gene expression changes controlling distinct adaptations in the heart and skeletal muscle of a hibernating mammal // Physiological Genomics. Vol. 47. No. 3. P. 58-74.

Wang L.C.H., Lee T.F. 2011. Torpor and hibernation in mammals: metabolic, physiological, and biochemical adaptations // Comprehensive Physiology. Supplement 14: Handbook of Physiology, Environmental Physiology. P. 507-532.

Xiong Z.J., Storey K.B. 2012. Regulation of liver lactate dehydrogenase by reversible phosphorylation in response to anoxia in a freshwater turtle // Comparative Biochemistry and Physiology − Part B: Biochemistry and Molecular Biology. Vol. 163. No. 2. P. 221-228.

Yamada S., Kamata T., Nawa H., Sekijima T., Take N. 2019. AMPK activation, eEF2 inactivation, and reduced protein synthesis in the cerebral cortex of hibernating chipmunks // Scientific Reports. Vol. 9. No. 11904. 11 p. [Электронный ресурс https://www.researchgate.net/publication/335179807_AMPK_activation_eEF2_inactivation_and_reduced_protein_synthesis_in_the_cerebral_cortex_of_hibernating_chipmunks/ (дата обращения 03.12.2019)].

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 106-111

ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 574.58

ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРСКО-КАСПИЙСКОГО ПРИБРЕЖНОГО РАЙОНА

© 2021 г. М.М. Османов, Ф.Ш. Амаева, А.А. Абдурахманова

Прикаспийский институт биологических ресурсов
Дагестанского федерального исследовательского центра РАН
Россия, 36700, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 45. E-mail: inkvachilav@mail.ru, a_frana@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2020. После доработки 15.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020.

Исследована структура сообществ зоопланктона Терско-Каспийского прибрежного района Каспийского моря в условиях зарегулирования стока реки Терек и пропуска его через Уч-Косинскую прорезь. Использован гидробиологический материал, собранный в акватории Терско-Каспийского прибрежного района Каспия. Приводятся многолетние данные распределения зоопланктона исследуемого района, отражающие характер влияния уровенного режима моря, засушливого климата, массового развития азово-черноморского вселенца *Acartia tonsa* (Dana, 1849) и трофического пресса гребневика *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) после пропуска стока р. Терек по новому руслу. Влияние этих факторов, в основном, отразились на автохтонной фауне акватории Терского прибрежья моря. Показано, что ранее ведущие аборигенные виды *Calanipeda aquae dulcis* и *Eurytemora grimmi* на долгий период отошли на второй план и только в последние годы *C. a. dulcis,* в связи со снижением пресса гребневика *Mnemiopsis leidyi,* вновь становится субдоминантной формой в зоопланктоне исследуемой акватории Каспийского моря.

Ключевые слова: Каспийское море, Уч-Косинская прорезь, засушливый климат, зоопланктон, видовое разнообразие, веслоногие раки, вселенцы.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10156

Территории, прилегающие к северо-западной части прибрежья Каспия, в силу их географического расположения, естественной и антропогенной нагрузки, сильно подвержены аридной деградации и опустыниванию. Аграханский полуостров, тянущий на 40 км с юга на север, до середины 70-х годов прошлого столетия был сильно подвержен опустыниванию, ветровой эрозии и засолению в связи с резким падением уровня моря.

После открытия прорези (Уч-Коса) через Аграханский полуостров северная часть залива высохла и превратилась в узкий канал, а южная часть стала водоемом озерного типа. Терские воды, впадая в Аграханский залив и периодически разливаясь по западному прибрежью, способствовали формированию водно-болотистых угодий, заросших, тростником, и пагубно влияли на экосистемы прилегающих хозяйств. Выносимый с прибрежья господствующими здесь юго-восточными ветрами песок приводил к частичному опустыниванию и к засолению почв.

Зарегулирование стока Терека и его пропуск через Уч-Косинскую прорезь в 1977 г. совпало с началом подъема уровня Каспия. Эти факторы стали определяющими в процессах восстановления ландшафтов в бассейне реки, а также Притерской части акватории моря.

В настоящее время, в связи с подъемом уровня моря и прямым выносом терских вод в Каспий, идет процесс накопления наносов, большей частью на южной части Нового Терека. Усиленное зарастание дельтовой зоны и образование тростниковых плавней, сопровождается сукцессионной сменой растительных ассоциаций, в которых выделяются рогоз, сусак и камышовые сообщества. Северная часть Аграханского полуострова высохла, ~~а~~ под влиянием аридного климатического режима водно-болотистая растительность постепенно сменяется на ковыльно-разнотравную. В южной части образовалось замкнутое Аграханское озеро с сильно заросшей растительностью береговой зоной.

Изменения условий среды привели к формированию богатой наземной и водной фауны притерской акватории моря. Здесь гнездятся и нагуливаются водные и околоводные птицы,

встречаются перелетные мигрирующие птицы и млекопитающие (Эльдаров, 2014). Формирование обширной дельтовой зоны способствовало увеличению биоразнообразия рыбного населения и многих других донных и пелагических беспозвоночных акватории прибрежья.

Основной целью данной работы является исследование состояния и структуры сообществ зоопланктона Терско-Каспийского прибрежного района Каспия как внутреннего водоема, расположенного в аридном климатическом поясе при меняющемся уровенном режиме моря, зарегулировании стока реки и формировании новой дельтовой зоны.

Материал и методы исследования

Использован многолетний гидробиологический материал, собранный в акватории Терско-Каспийского прибрежного района сетью Апштейна (малая модель), диаметр входного отверстия 25 см, сита из газа № 38) по установленным разрезам с охватом глубин 2, 5, 10 и 20 м. Всего собрано и обработано 336 проб зоопланктона. Камеральная обработка проводилась счетно-весовым методом по общепринятым методикам (Инструкция ..., 1977; Современные методы …, 1983; Атлас беспозвоночных ..., 1968; Атлас основных кормовых …, 2002). Определение гидробионтов проводилось до уровня видов, за исключением редко встречающихся циклопоидов, а также личинок планкто-бентических групп организмов.

Результаты и обсуждение

Пропуск терских вод по новому руслу привел к значительному опреснению прилегающей акватории моря, формированию новой дельтовой системы, обмелению и образованию кос, расширению суши и зарастанию отдельных участков. Сформировалась устойчивая дельтовая зона, заросшая тростником и другой водной растительностью по обеим сторонам прибрежья, преимущественно в южной части, где оседает выносимый рекой твердый сток. Прямое попадание богатых биогенами и пресноводной фауной пресных вод Терека в море привело к значительному опреснению прибрежья (1-4‰).

Величина зоны распреснения зависит от стока реки Терек и засушливых климатических условий. В зависимости от скорости и направления ветра, зона смешения речных и морских вод может меняться от 5.5 до 13 км (Малюк, Семеняк, 1982; Алиев и др., 1983). Значительное опреснение устьевой зоны и прилегающих к ней акваторий в последующие годы способствовало увеличению видового разнообразия, а также численности и плотности популяций гидробионтов (табл. 1). Гидробиологическими исследованиями, проведенными до зарегулирования стока Терека (1976 г.) был отмечен низкий качественный состав и уменьшение количественного состава зоопланктонных организмов (Саидов и др., 1989).

Это обусловлено увеличением доли пресноводных и солоноватоводных коловраток и ветвистоусых раков. Из 39 видов зоопланктона, зафиксированных в акватории Уч-Косинской прорези, наиболее характерными являются 18-20 видов. Среди них 7-8 видов веслоногих, 5-6 – ветвистоусых раков, 9-10 – коловраток, а также около 13-14 видов различных групп планкто-бентических организмов, личинки балянусов, насекомых и рыб.

До открытия прорези отмечалось невысокое, но равномерное распределение видового разнообразия между ведущими группами организмов, а индекс биотического разнообразия по Шенону равнялся 1.5 бит. Более высокий показатель индекса биотического разнообразия (1.8), зафиксированный в 1990 г., был связан с быстрым подъемом уровня моря и обогащением зоопланктонных сообществ акватории района исследований пресноводным комплексом организмов. Наименьший показатель индекса Шенона 1.4, отмеченный в 2000 г. объясняется сильным трофическим прессом Азово-Черноморского вселенца гребневика *Mnemiopsis leidyi* на гидрофауну того периода, особенно уменьшением количества веслоногих раков.

Доминирующим видом в акватории Уч-Косинской прорези являлся веслоногий рачок (из *Copepoda*) *Calanipeda aquae dulcis* (*Kritsch*), на долю которого приходилось более 90% общей биомассы зоопланктона. Благоприятными оказались условия среды для массового развития не только ведущих копепод, но и многих кладоцер, коловраток и личинок планкто-бентических организмов. Можно утверждать, что за счет этих процессов средняя биомасса зоопланктона в осенне-летний период превышала 1100 мг/м^3 (рис. 1).

Таблица 1. Список видов и форм зоопланктонных организмов Терско-Каспийского прибрежного района в период с 1976 по 2015 годы.

N	Организмы	Годы							
		1976	1986	1990	1995	2000	2005	2010	2015
	Protozoa								
1.	*Codonella relicta* Minkiewitsch, 1905	-				+	-	-	-
2.	*Tintinnopsis karajacensis* Brandt, 1896	-				+	+	-	-
	Hidroidea								
1.	*Moerisia pallasi* Derzhavin	+	+	+	+	+	-	-	-
2.	*Blecphordia virginica* Maer	-	-	-	+	+	-	-	+
	Rotifera								
1.	*Asplanchna priodonta* Gosse, 1850	-	+	+	+	+	+	+	+
2.	*Trichocerca caspica* Tschhugunoff, 1921	-	-	+	+	+	+	-	-
3.	*Sinchaeta stylata* Wierzejski, 1893	+	+	+	+	+	+	+	+
4.	*Sinchaeta cecilia fusipes* Buchholz, 1952	-	+	+	+	+	+	+	+
5.	*Brachionus plicatilis* O.F. Müller, 1786	-	-	+	+	+	+	+	+
6.	*Brachionus diversicornis* Daday, 1883	-	-	+	+	+	+	+	-
7.	*Brachionus cuadridentatus* Hermann, 1893	+	+	+	+	+	+	+	+
8.	*Keratella tropica* Apstein,1907	+	+	+	+	+	+	+	+
9.	*Notholca squamula* O.F. Müller, 1786	-	-	-	-	+	+	+	-
10.	*Filinia limneatica* Zacharias, 1893	-	-	+	+	+	+	-	-
11.	*Hexarthra oxyuris* Zernov, 1903	-	+	+	+	+	-	-	-
	Cladocera								
1.	*Poliphemus exiqus* G.O. Sars, 1897	-	-	+	+	+	-	-	+
2.	*Cercopagis pengoi* Ostroumov,1891	+	+	+	+	+	-	-	-
3.	*Apagys cylindrata* G.O. Sars, 1902	-	-	-	-	+	-	-	-
4.	*Podon poliphemoides* Leuckart, 1859	+	-	-	-	+	+	-	-
5.	*Evadne anonyx typica* G.O. Sars, 1897	+	+	+	+	+	-	-	-
6.	*Evadne anonyx prolongata* Behning, 1938	-	-	+	-	+	-	-	-
7.	*Evadne anonyx producta* G.O. Sars, 1902	-	+	-	-	-	-	-	-
8.	*Podonevadne trigona typica* G.O. Sars,1897	+	+	+	+	+	+	+	+
9.	*Podonevadne trigona trigonoides* G.O. Sars, 1897	-	+	+	+	+	-	-	-
10.	*Podonevadne camptonyx typica* G.O. Sars, 1897	-	-	+	+	+	+	-	-
11.	*Podonevadne camptonyx orthonyx* G.O. Sars, 1897	-	+	+	+	-	-	-	-
12.	*Chydorus sphaericus* O.F. Müller, 1785	-	-	-	+	+	+	+	-
13.	*Bosmina longirostris* O.F. Müller, 1785	-	-	+		+	+	+	+
	Copepoda								
1.	*Limnocalanus grimaldii* Guerne, 1886	-	-	-	+	-	-	-	-
2.	*Calanipeda aquaedulcis* Kritschagin, 1873	+	+	+	+	-	-	+	+
3.	*Acartia tonsa* Dana, 1849	-	+	+	+	+	+	+	+
4.	*Eurytemora grimmi* G.O. Sars, 1897	-	+	+	+	+	+	+	+
5.	*Eurytemora affinis* Poppe, 1880	-	+	+	+	-	-	-	-
6.	*Heterocope caspia* G.O. Sars,1863	-	+	+	+	-	-	-	-
7.	*Halicyclops sarsi* Acatova, 1935	+	+	+	+	-	-	-	-
8.	Harpacticoida ssp.	-	+	+	+	-	-	-	-
9.	Ciclopoidae	+	+	+	+	-	-	-	-
10.	*Nauplii Copepoda* Milne-Edwards, 1840	+	+	+	+	+	+	+	+

По данным Ю.С. Саидова с соавторами (1982), а также Ю.С. Чуйкова и П.П. Денискина (1985), к началу 1980 гг. в устьевой зоне р. Терек количество видов рыб увеличилось до 28, а их численность возросла в 4 раза. Пресс нагуливающейся молоди рыб в весенне-летний период заметно отразился на кормовом зоопланктоне, поэтому в последующие годы средние показатели численности и биомассы зоопланктона значительно снизились, но абсолютное количество оставалось выше по сравнению с периодом до открытия прорези.

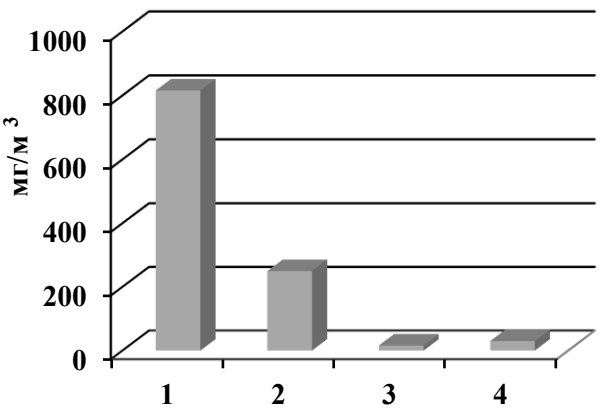

Рис. 1. Распределение основных групп зоопланктона в Терско-Каспийском прибрежном районе в 1977 г. *Условные обозначения:* 1 – *Copepoda*, 2 – *Cladocera*, 3 – *Rotatoria,* 4 – прочие организмы.

Интенсивное вселение и массовое развитие прибрежья азово-черноморским вселенцем *Acartia tonsa* (Dana, 1849) в начале 80-х годов привело к вытеснению многих групп гидробионтов Каспийского моря. Под пресс этого успешно развивающегося аутовселенца попали многие доминирующие аборигенные виды, такие как: *C.a. dulcis, Eurytemora grimmi* (G.O. Sars, 1897), *Halicyclops sarsi* (Acatova, 1935) и др., что является одной из основных причин снижения их численности в последующие годы. 1988-1990 годы характеризовались вспышкой развития акарции по всей западной части Среднего Каспия. Причем максимально высокая численность рачка была отмечена в исследуемом районе прибрежья (Османов, 1998; Османов и др., 2005). Таким образом, зоопланктон Терско-Каспийского прибрежного района с начала 1980 до середины 1990 гг. формировался в условиях климатических изменений, поднимающегося уровня моря и массового развития азово-черноморского вселенца *A. tonsa*. Эти факторы способствовали повышению продуктивности зоопланктона по западному прибрежью Каспийского моря. Вместе с тем отмечается и отрицательное влияние этого процесса на биологическое разнообразие Каспийского моря, особенно на его автохтонную часть. Аборигенные виды и другие широко распространенные прибрежные формы гидробионтов оказались вытесненными вселенцем.

Быстрая и успешная интродукция вселенца *Mnemiopsis leidyi* (Agassiz) со второй половины 1990 г. привела к разрушению структуры устоявшихся экосистем Каспийского моря. Хищнический пресс привел к падению численности и уничтожению многих ведущих групп и видов гидрофауны Каспийского моря и катастрофическому снижению биомассы зоопланктона исследуемого района почти на 2 порядка (Османов, 2011).

К 2000 г. стабилизировался уровенный режим моря, и основным фактором, влияющим на распределение численности и биомассы зоопланктона в западном прибрежье Среднего Каспия в последующие годы, оставался его трофический пресс (Османов и др., 2005). В этот период около 97% летнего зоопланктонного комплекса Уч-Косинской прорези составляли акарциды. Установлено, что снижение численности и стабилизация развития гребневика способствовали формированию устойчивых биоценозов гидробионтов в экосистеме дельтовой зоны реки Терек с ведущей ролью вселенца *A. tonsa* (табл. 2).

Этот рачок менее подвержен прессу гребневика *M. leidyi* и в других прибрежных районах Каспийского моря (Гусейнов и др., 2005; Османов, 2011; Османов, 2016; Сокольский и др., 2002). Наиболее густо заселенной акарцидами и другими группами беспозвоночных оказалась прибрежная мелководная полоса вдоль 2-метровой изобаты от полуострова Лопатина до Сулакского маяка и морская глубоководная (10 м и более) часть акватории, богатая биогенными элементами.

Небольшое снижение средней биомассы на 5-метровой глубине можно объяснить трофическим прессом на зоопланктон питающейся молоди рыб. Средние показатели биомассы зоопланктона (табл. 2) летом 2016 г. составляли 231.25 мг/м^3 при численности 11592 экз./м^3.

Показатели плотности гидробионтов указывают на снижение влияния хищника и об устойчивом

характере зоопланктонных сообществ в этой части прибрежья Каспия.

Многолетняя динамика распределения зоопланктона в акватории Уч-Косинской прорези наглядно отражена на рисунке 2.

Таблица 2. Распределение средней численности (экз./м^3) и биомассы (мг/м^3) зоопланктона по глубинам в Терско-Каспийской прибрежной зоне летом 2016 г.

Глубина, м	Разрезы					
	Лопатин	Уч-Косинская прорезь	Красный ногаец	Сулакский маяк	Среднее	% *A. tonsa* в биомассе
2	18100*/357.40	11000/318.38	12600/233.10	13400/361.2	13775/317.52	94.0
5	10548/159.42	8340/143.0	7950/135.40	7050/131.70	8472/142.38	89.64
10	17176/285.15	12927/275.83	8185/163.92	11832/211.04	12530/233.86	94.42
Среднее	15274/267.32	10755/245.73	9578/177.3	10760/234.64	11592/231.25	93.2

Примечание к таблице: *над чертой – численность, под чертой – биомасса.

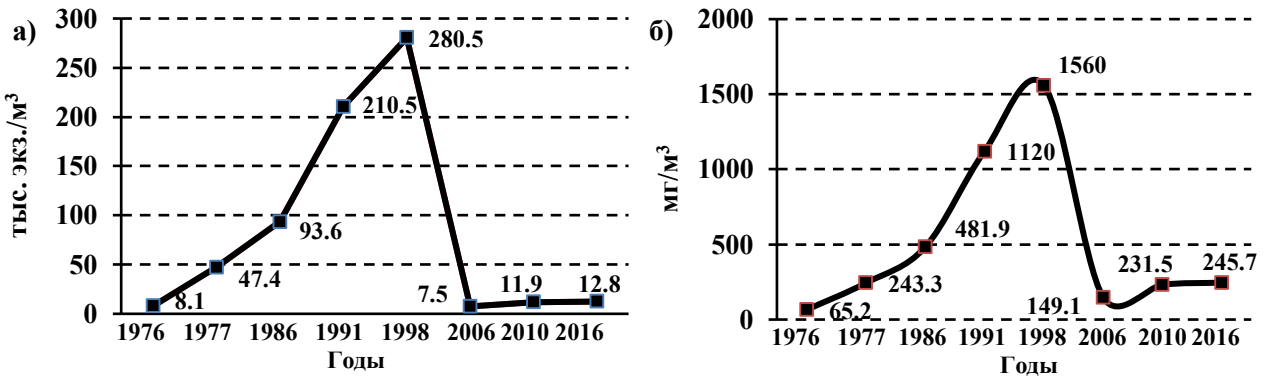

Рис. 2. Многолетняя динамика распределения численности (а) и биомассы (б) зоопланктона в прибрежной зоне Уч-Косинской прорези.

До 1976 г., в период низкого уровенного режима Каспийского моря, показатели численности и биомассы зоопланктона были невелики. С 1976 г. до конца 1990-х гг. резко возросла продуктивность зоопланктона и увеличилось его биоразнообразие. Этому способствовали открытие Уч-Косинской прорези и прямой пропуск терских вод через аграханский полуостров в море, совпавшие с началом подъема уровня Каспия, а также интродукция *A. tonsa* в Каспии в начале 1980-х гг.

С 1998 по 2006 гг. зоопланктонные сообщества находились под пищевым прессом усиленно развивающегося в Каспии вселенца гребневика *M. leidyi.* Это нарушило веками существовавшую трофическую структуру в экосистемах моря и привело к падению продуктивности зоопланктона моря. 2010-2016 гг. можно охарактеризовать как период ослабления влияния мнемиопсиса на морскую экосистему и начала формирования устойчивых зоопланктонных сообществ в новых условиях среды.

Заключение

Определяющими факторами, влияющими на формирование зоопланктонных комплексов и их продуктивность исследуемого района моря, являются колебания уровня моря, сток реки Терек и формирование новой дельтовой системы, а за последние десятилетия также пресс азово-черноморских вселенцев. Для периода низкого уровенного режима Каспийского моря характерны

низкие значения численности и биомассы зоопланктона, а в период подъема уровня эти количественные показатели возрастают. С открытием Уч-Косинской прорези и пропуском терских вод непосредственно в Каспийское море значительно обогатился таксономический состав и численность зоопланктона Терско-Каспийского прибрежного района моря. В этих условиях менялась структура зоопланктонного комплекса под влиянием процессов, связанных с изменением уровенного режима и засушливых климатических условий. После интродукции в 1980-х гг. *A. tonsa* стал абсолютным доминантом, вытеснив ранее ведущие автохтонные виды. В многолетней динамике в исследуемых зоопланктонных сообществах до вселения *A. tonsa* по шкале Любарского доминировал автохтонный вид *C.a. dulcis,* а субдоминантом выступал *E. grimmi*. В последние годы *C.a. dulcis* в связи со снижением пресса гребневика *M. leidyi,* стала субдоминантной формой в зоопланктоне притерского прибрежного района Каспия. Вероятно, в ближайшие годы, в соответствии с создавшимися условиями среды, в экосистеме исследуемой прибрежной акватории будет наблюдаться процесс усиления засушливости климата, расширения дельтовой зоны с южной стороны с образованием мелких лиманов, зарастающих погруженной и полупогруженной растительностью, где будут представлены фито-зоопланктонные и бентосные комплексы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алиев И.А., Зайденберг Я.П., Малюк В.И., Сайбуллаев М-Т.С. 1983. Биогенный сток р. Терек в условиях формирования новой дельты при открытой прорези через Аграханский полуостров // Водные ресурсы бассейна р. Терек и их использование. Ростов-на-Дону. С. 197-170.

Атлас беспозвоночных Каспийского моря. 1968. М.: Пищевая промышленность. 416 с.

Атлас основных кормовых организмов рыб Нижней Волги и Каспийского моря. 2002 / Ред. А.Ф. Сокольский, Е.К. Курашова, Т.Г. Степанова. Астрахань. 394 с.

Гусейнов М.К., Османов М.М., Гусейнов К.М. 2005. Изменение структуры пелагической экосистемы дагестанского района Каспия под воздействием гребневика *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) // Океанология. Т. 45. № 1. С. 69-72.

Инструкция по сбору и обработке планктона. 1977. М.: ВНИРО. 72 с.

Малюк В.И., Семеняк Л.В. 1982. Формирование гидрологического режима района Дагестанского побережья от Лопатина до Махачкалы // Биологические ресурсы Дагестанского района прибрежья Каспийского моря. Махачкала: ДагФАН СССР. С. 5-13.

Османов М.М. 1998. Зоопланктон прибрежных мелководий западной части среднего Каспия // Современное состояние промысловых рыб и кормовых ресурсов дагестанского района Каспийского моря. Махачкала: ДНЦ РАН. С. 4-9.

Османов М.М., Алигаджиев М.М., Амаева Ф.Ш. 2005. Биоэкологическая характеристика акватории Терско-Каспийского рыбохозяйственного района Каспия // Современные наукоемкие технологии. М.: Академия естествознания. №9. С. 100-102.

Османов М.М. 2011. Современное состояние зоопланктона прибрежья дагестанского района Каспия // Современные проблемы биологии и экологии: материалы докладов международной научно-практической конференции Махачкала, 10-12 марта 2011 г. С. 189-192.

Османов М.М. 2016. Современное состояние автохтонного комплекса зоопланктона в экосистемах дагестанской части прибрежья Каспия // Современное состояние и перспективы развития аквакультуры в Прикаспийском регионе: материалы международной конференции, посвященной 85-летию ДГУ. Махачкала, 17-19 октября 2016 г. С. 107-111.

Саидов Ю.С., Мохов Г.М., Гусейнов М.К., Османов М.М. 1989. Ихтиологические и гидробиологические исследования морской акватории нового устья р. Терек // Биологические ресурсы Каспийского моря. Махачкала: ДагФАН СССР. С. 30-46.

Саидов Ю.С., Устарбеков А.К., Дворников П.И. 1982. Состояние биологических ресурсов Терско-Каспийского района в связи с изменением русла р. Терек // Материалы IV всесоюзного съезда Гидробиологического общества. Т. 2. Киев. С. 85

Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. 1983 / Ред. М.Е. Виноградов М.: Наука. 279 с.

Сокольский А.Ф., Камакин А.М., Студеникина Ю.Б. 2002. Биология и распространение гребневика *Mnemiopsis leidyi* // Современные проблемы Каспия: материалы международной конференции, посвященной 105-летию КаспНИРХа. Астрахань. С. 124-129.

Чуйков Ю.С., Денискин П.П. 1985. О зоопланктоне дельты Терека // Гидробиологический журнал. №2. С. 11-13.

Эльдаров Э.М. 2014. Озеро Южный Аграхан: проблемы экологической реабилитации. Махачкала. 156 с.

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2021, том 27, № 2 (87), с. 112-119

ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 574.587(275.2):591

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЗООПЛАНКТОНА ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (Р. ДОН)[1]

© 2021 г. В.И. Лазарева

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок. E-mail: lazareva_v57@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2020. После доработки 30.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020

В августе-сентябре 2018 г. изучены структура и распределение зоопланктона Цимлянского водохранилища. Установлено, что количество зоопланктона вдвое снижалось от Верхнего участка водохранилища (2.4±0.8 г/м^3) к плотине Цимлянской ГЭС (1.2±0.6 г/м^3), 70% биомассы формировали организмы Copepoda. Массовыми видами копепод были понто-каспийская *Heterocope caspia* и вселенцы *Calanipeda aquaedulcis*, *Thermocyclops taihokuensis* и *Acanthocyclops americanus*. По литературным данным проанализирована динамика обилия зоопланктона водохранилища за более чем 65 лет его существования (1952-2018 гг.). Выявлено увеличение более чем вдвое (до 2.1±0.5 г/м^3) биомассы сообщества в 2015-2018 гг. по сравнению с 40-летним периодом до 2013 года (0.8±0.1 г/м^3). Обсуждаются тенденции в динамике обилия зоопланктона водохранилища, в том числе, значение в сообществе понто-каспийских ракообразных и вселенцев из других регионов.

Ключевые слова: река Дон, Цимлянское водохранилище, зоопланктон, вселенцы, структура, обилие, многолетняя динамика.
DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10157

Цимлянское водохранилище заполнено в 1952-1953 гг. и функционирует уже более 65 лет. Зоопланктон р. Дон до создания водохранилища не исследовали (Лившиц, 1954; Дзюбан, 1958). Однако мониторинг зоопланктона проводится с первых лет существования водоема до настоящего времени (Лившиц, 1954; Дзюбан, 1958; Шейнин, 1960; Кафтанникова, 1965; Гламазда, 1971а, 1974; Шевлякова, 2002; Свистунова, Саяпин, 2010; Вехов и др., 2014; Предварительные материалы …, 2018; Голоколенова и др., 2019). Установлено, что в конце 1950-х годов солоноватоводные Copepoda начали вытеснять пресноводных Cladocera, характерных для р. Дон (Кафтанникова, 1965; Гламазда, 1971а), а в 1960-хв водоеме расселились понто-каспийские Cladocera (Гламазда, 1969, 1971б).

Подробно изменения состава, структуры и обилия сообщества водохранилища проанализированы по данным 1950-1970-х годов (Дзюбан, 1958; Шейнин, 1960; Кафтанникова, 1965; Гламазда, 1971а, 1974). Отмечено, что с 1955 г. началось снижение летней биомассы зоопланктона (Кафтанникова, 1965). В 1960-х годах при массовом развитии понто-каспийских видов биомасса снизилась ниже 2 г/м^3, в отдельные годы ниже 1 г/м^3 (Кафтанникова, 1965; Гламазда, 1971а, 1974). Тенденции в развитии зоопланктона после 1970-х годов (более 40 лет) и трофические взаимоотношения внутри сообщества фактически не исследованы.

Целью работы было изучить структуру и распределение обилия в летнем зоопланктоне Цимлянского водохранилища, оценить значение в сообществе понто-каспийских ракообразных и вселенцев из других регионов, а также проанализировать динамику обилия зоопланктона за все время существования водоема.

Материалы и методы

Район работ. В среднем течении р. Дон около 200 км от устья (координаты центра: 47° 50′ с.ш., 42° 50′ в.д.) существует единственное на этой реке Цимлянское водохранилище. При нормальном подпорном уровне (НПУ=36 м н.у.м. БС) его площадь 2700 км², средняя глубина 8.8 м, максимальная

[1] Работа выполнена в рамках тем государственного задания Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН: № АААА-А18-118012690105-0 и № АААА-А18-118012690106-7.

30 м, скорость водообмена 1.05 год$^{-1}$ (Авакян и др., 1987). Чаша водохранилища образована котловиной с тремя расширениями, приуроченными к устьевым областям рек Чир, Аксай Курмоярский и Цимла, выделяют четыре плеса: Верхний, Чирской, Потемкинский и Приплотинный (Гидрометеорологический режим …, 1977). Водохранилище характеризуется обширными мелководьями, при НПУ участки с глубиной менее 5 м составляют 29% акватории (Вехов и др., 2014). По уровню развития фитопланктона (до 50 мг/л) водоем относят к гипертрофным (Цимлянское водохранилище …, 2011; Вехов и др., 2014; Никаноров, Хоружая, 2014). Материал собирали в конце августа – начале сентября 2018 г. с экспедиционного судна «Академик Топчиев» Института биологии внутренних вод имение И.Д. Папанина РАН, а в прибрежье – с лодки. Обследовано 16 участков водохранилища (рис. 1).

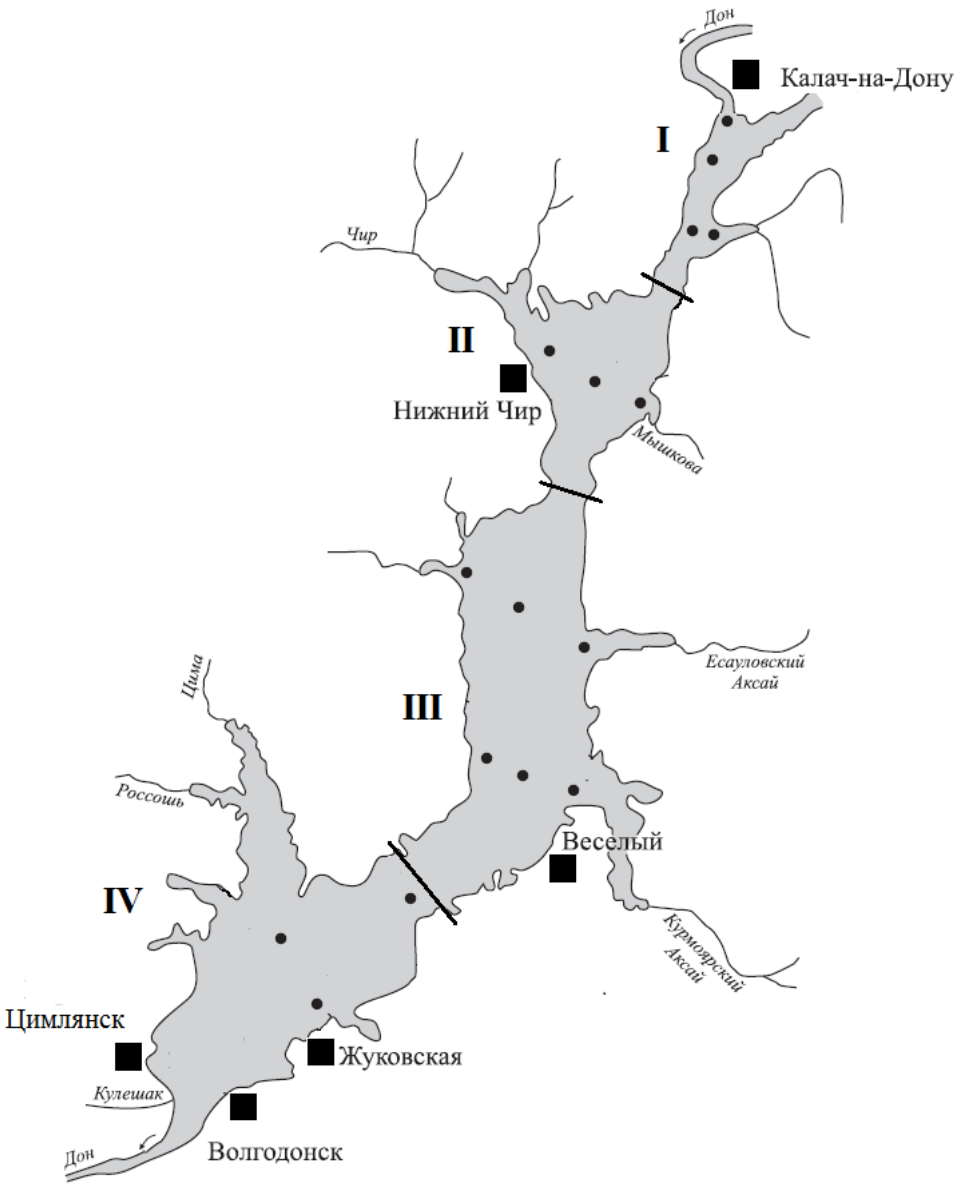

Рис. 1. Расположение станций отбора проб зоопланктона в Цимлянском водохранилище. *Условные обозначения.* Участки: I – Верхний, II – Чирской, III – Потемкинский, IV – Приплотинный.

Методы сбора и анализа данных. Зоопланктон (Cladocera, Cyclopoida, Calanoida, Rotifera) учитывали в тотальных пробах, которые отбирали сетью Джеди с диаметром входного отверстия 12 см и ситом с диагональю ячеи 105 мкм. Сборы фиксировали 4%-формалином и просматривали в

лаборатории под стереомикроскопом StereoDiscovery-12 (Carl Zeiss, Jena). Ракообразных и коловраток идентифицировали с использованием руководств (Кутикова, 1970; Монченко, 1974; Мордухай-Болтовской, Ривьер, 1987; Боруцкий и др., 1991; Определитель …, 2010; Monchenko, 2008; Sukhikh, Alekseev, 2013). Доминантные виды выделяли по их относительной биомассе (более 10% общей биомассы зоопланктона).

В пробах определяли численность и биомассу каждого вида, их суммарные значения для каждой таксономической группы и общие для всего зоопланктона. Биомассу рассчитывали по формулам связи индивидуальной массы с длиной тела животных (Балушкина, Винберг, 1979; Ruttner-Kolisko, 1977). Средние значения характеристик зоопланктона и их ошибки рассчитывали с использованием соответствующих процедур пакета STATISTICA for Windows, v. 10 (StatSoft Russia).

Результаты и их обсуждение

Структура зоопланктона. Доминантный комплекс зоопланктона Цимлянского водохранилища включал 8 видов преимущественно копепод, по 2-3 в каждом из четырех участков (табл. 1). В верхней части водоема выше устья р. Донская царица основубиомассы зоопланктона (90%) формировали *Moina micrura* Kurz, 1874, а также недавние вселенцы *Thermocyclops taihokuensis* (Harada, 1931) и *Acanthocyclops americanus* (Marshall, 1893). В створе этой реки и Чирском плесе преобладали (75%) *Thermocyclops taihokuensis* и *Acanthocyclops americanus*, в мелководном заливе р. Чир до 14% биомассы приходилось на *Diaphanosoma orghidani* Negrea, 1982. Начиная от створа рек Аксеней–Аксай Есауловский, сначала на русле р. Дон, а ниже повсеместно 65-95% биомассы образовывали *Heterocope caspia* Sars, 1897 и *Calanipeda aquaedulcis* Kritschagin, 1873. Коловратки *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850 доминировали (70-75% биомассы зоопланктона) в устьях рек Аксай Курмоярский и Аксай Есауловский, в Потемкинском участке водоема их вклад в биомассу достигал в среднем 15%.

Таблица 1. Доминантные виды зоопланктона различных участков Цимлянского водохранилища в августе-сентябре 2018 г.

Таксон \ Участок	Верхний		Чирской		Потемкинский		Приплотинный	
	B_{sp}*	%$B_{общ.}$**	B_{sp}	%$B_{общ.}$	B_{sp}	%$B_{общ.}$	B_{sp}	%$B_{общ.}$
Crustacea								
Moina micrura	1004	41	<10	<1	<10	<1	0***	0
Thermocyclops taihokuensis	809	33	563	55	99	5	<10	<1
Acanthocyclops americanus	398	16	210	20	<10	<1	30	3
Diaphanosoma orghidani	125	5	140	14	<10	<1	<10	<1
Heterocope caspia	<10	<1	21	2	1078	54	288	25
Calanipeda aquaedulcis	<10	<1	20	2	200	10	772	67
Rotifera								
Asplanchna priodonta	<10	<1	0	0	302	15	<10	<1

Примечания к таблице 1: B_{sp}* – средняя биомасса вида, мг/м^3, %$B_{общ.}$** – вклад в общую биомассу зоопланктона (%), 0*** – вид отсутствовал в пробах, серым цветом выделены участки с доминированием видов.

В 2018 г. в Цимлянском водохранилище обнаружены пять солоноватоводных понто-каспийских хищных ракообразных (*Heterocope caspia*, *Eurytemora caspica* Sukhikh et Alekseev, 2013, *Cercopagis pengoi* (Ostroumov, 1891), *Cornigerius maeoticus maeoticus* (Pengo, 1879) и *Podonevadne trigona ovum* (Zernov, 1901)), которые обитают здесь в пределах своего древнего ареала (Мордухай-Болтовской, 1960). Наиболее многочисленны были копеподы *Heterocope caspia* (до 128 тыс. экз./м^3) и *Eurytemora caspica* (до 18 тыс. экз./м^3), остальные обнаружены в Верхнем и Потемкинском участках водохранилища единично (менее 100 экз./м^3). Заметим, что *Eurytemora caspica* ранее (с середины

1970-х годов) идентифицировали как *Eurytemoraaffinis* (Poppe, 1880; Шевлякова, 2002; Свистунова, Саяпин, 2010; Вехов и др., 2014). В 2013 г. *E. caspica* выделена из комплекса криптических видов*E. affinis* s.l. (Sukhikh, Alekseev, 2013). Морфологическими и молекулярными методами доказано (Sukhikh et al., 2020), что в водохранилищах Волгиобитает *E. caspica*, а не *E. affinis*. В 2018 г. в зоопланктоне Цимлянского водохранилища также повсеместно обнаружена только *E. caspica* (Lazareva, 2020).

Чужеродными для водоема являются два вида копепод. Это средиземноморская *Calanipeda aquaedulcis*, вселившаяся в водохранилище в конце 1950-х годов (Гламазда, 1971а), и восточно-азиатский *Thermocyclops taihokuensis* (sin. *T. asiaticus* (Kiefer, 1932), появившийсяв 2012 г. (Вехов и др., 2014). Последний вид в 2010-х годах расселился в Нижнюю Волгу (Нечаев, 2016; Лазарева и др., 2018). Вероятно, из р. Волги по Волго-Донскому каналу он проник в Цимлянское водохранилище. Кроме того, в 2018 г. в водохранилище впервые отмечена копепода *Acanthocyclops americanus*. Вид обычен в водоемах юга Европейской России (Монченко, 1974), его расселение в водохранилище представляет результат расширения ареала. Ранее *A. americanus* находили в дельте р. Дон (Свистунова и др., 2014), он также широко распространен в водохранилищах Волги и Камы (Лазарева и др., 2018).

Распределение обилия зоопланктона. Наибольшую численность в Цимлянском водохранилище образовывали Cyclopoida (40% общей численности зоопланктона) и Rotifera (32%), Cladocera сравнительно многочисленны (22%) только в Верхнем участке водоема, а каляноидные Copepoda – в Потемкинском (30%) и Приплотинном (58%) участках. Максимальная численность (400 тыс. экз./м^3) наблюдалась в Верхнем участке водоема, наименьшая – в Приплотинном (121 тыс. экз./м^3; табл. 2). Особенно многочисленным (919 тыс. экз./м^3) был зоопланктон в устьевой области р. Донская царица. Количество личинок (велигеров) моллюсков рода *Dreissena* на большей части акватории водохранилища не превышало 10 тыс. экз./м^3 (табл. 2). Только в Потемкинском участке у правого берега водохранилища отмечали до 47 тыс. экз./м^3. Их в биомассу зоопланктона был очень мал (в среднем около 1%).

Таблица 2. Численность и биомасса зоопланктона Цимлянского водохранилища в августе-сентябре 2018 г.

Участок	Зоопланктон					Dreissena veliger
	Cladocera	Cyclopoida	Calanoida	Rotifera	Сумма	
Численность, тыс. экз./м^3						
Верхний	87±45	238±149	<1	69±49	395±179	<0.5
Чирской	12±5	161±48	8±4	45±18	226±63	1±0.6
Потемкинский	4±2	15±8	69±23	134±48	223±64	14±7
Приплотинный	3±1	24±10	70±28	24±12	121±32	5±1
Все водохранилище	26±14	100±42	41±13	80±24	247±53	6±3
Биомасса, г/м^3						
Верхний	1.16±0.70	1.21±0.69	<0.01	0.07±0.05	2.44±0.77	<0.01
Чирской	0.16±0.03	0.77±0.24	0.06±0.02	0.04±0.01	1.03±0.24	<0.01
Потемкинский	0.10±0.04	0.14±0.01	1.33±0.69	0.42±0.17	1.99±0.82	0.02±0.01
Приплотинный	0.02±0.01	0.04±0.01	1.07±0.64	0.02±0.01	1.16±0.65	0.01±0.002
Все водохранилище	0.36±0.19	0.51±0.20	0.71±0.31	0.19±0.08	1.77±0.38	0.01±0.004

Основу биомассы зоопланктона водохранилища формировали ракообразные: Calanoida (40%), Cyclopoida (29%) и Cladocera (20%). Биомасса сообщества разных участков водоема варьировала более чем вдвое (1.0-2.4 г/м^3). Максимальные значениярегистрировали в Верхнем (до 4 г/м^3) и Потемкинском (до 6 г/м^3) участках, минимальные (менее 1.5 г/м^3) – в Чирском участке и большинстве станций у плотины ГЭС (рис. 2). В 2018 г. средний уровень биомассы зоопланктона водохранилища (1.8±0.4 г/м^3) был сопоставим с наблюдаемым в эвтрофных водохранилищах Верхней

Волги и Камы (1-2 г/м^3; Лазарева и др., 2018; Lazareva, Sokolova, 2015). Однако он был существенно выше по сравнению с мезотрофными водохранилищами Нижней Волги (0.2-1.2 г/м^3), также расположенными в аридной зоне (Малинина и др., 2016; Лазарева и др., 2018). Для сравнения, в эвтрофном Кременчугском водохранилище на р. Днепр в 2000-х годах количество зоопланктона (0.1-0.9 г/м^3) оценено как очень низкое (Кружилина, Диденко, 2007).

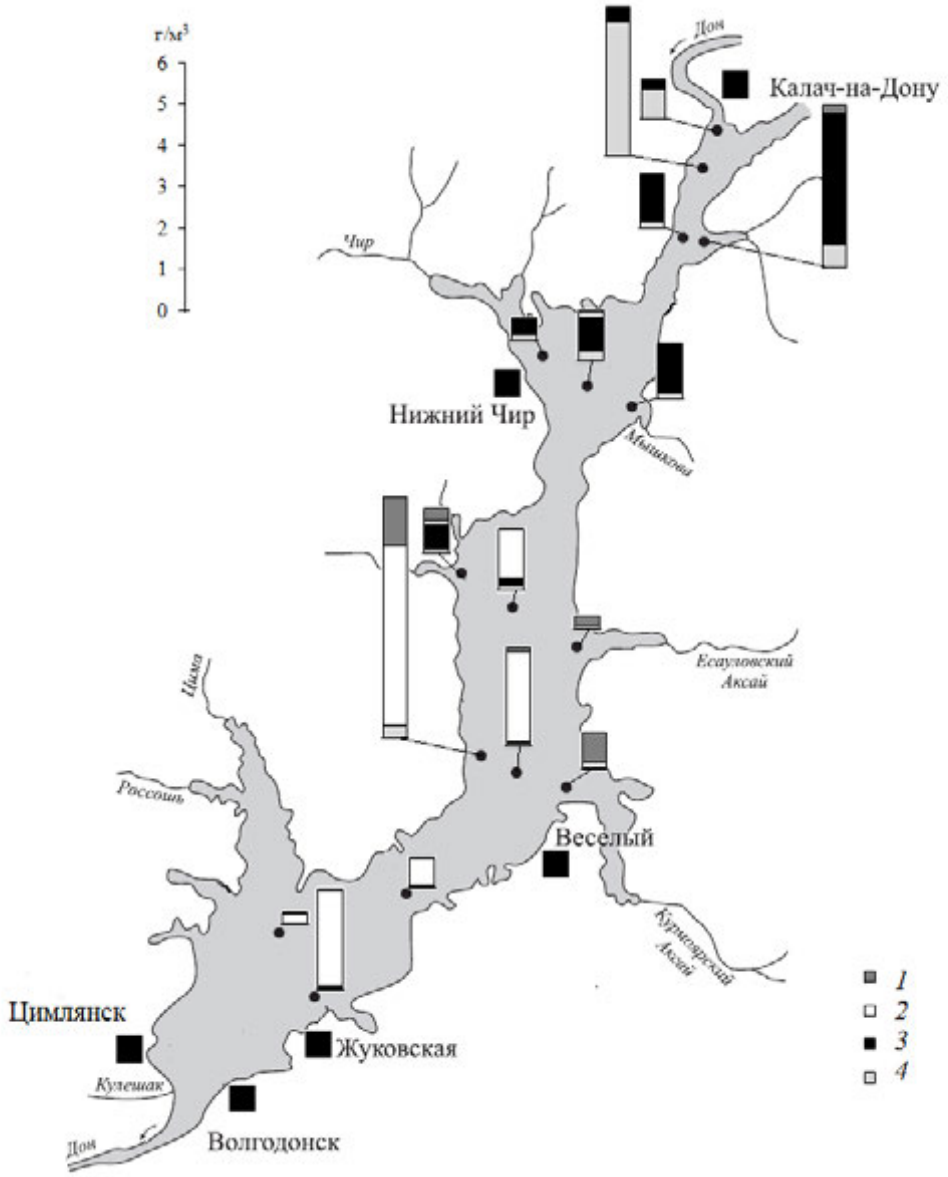

Рис. 2. Распределение биомассы зоопланктона по акватории Цимлянского водохранилища летом 2018 г. *Условные обозначения:* 1 – Rotifera, 2 – Calanoida, 3 – Cyclopoida, 4 – Cladocera.

Многолетняя динамика. Динамику зоопланктона Цимлянского водохранилища анализировали по летней (июль-август) биомассе, близкой к летне-осеннему максимуму развития сообщества (Гламазда, 1971а). За период (1952-2018 гг.) отмечены существенные вариации количества зоопланктона. Пик его биомассы (3.8-4.6 г/м^3) регистрировали в первые три года существования водоема (рис. 3). В конце 1950-х годов биомасса снизилась до значений менее 1.5 г/м^3, в отдельные годы во второй половине лета отмечали значения 0.5-0.8 г/м^3 и даже ниже (0.3 г/м^3 в 2001 г. и 0.1 г/м^3 в 2008 г.). В настоящее время (2015-2018 гг.), напротив, отмечен рост летней биомассы зоопланктона, ее средние значения (2.1±0.5 г/м^3) достоверно в 2.6 раза выше отмеченных в 1972-2013 гг. (0.8±0.1 г/м^3) и близки к уровню конца 1950-х годов. По-видимому, это связано с высокой долей в

современном планктоне водоема крупных (длина тела 1.1-1.6 мм) ракообразных *Heterocope caspia*, *Calanipeda aquaedulcis* и *Acanthocyclops americanus*.

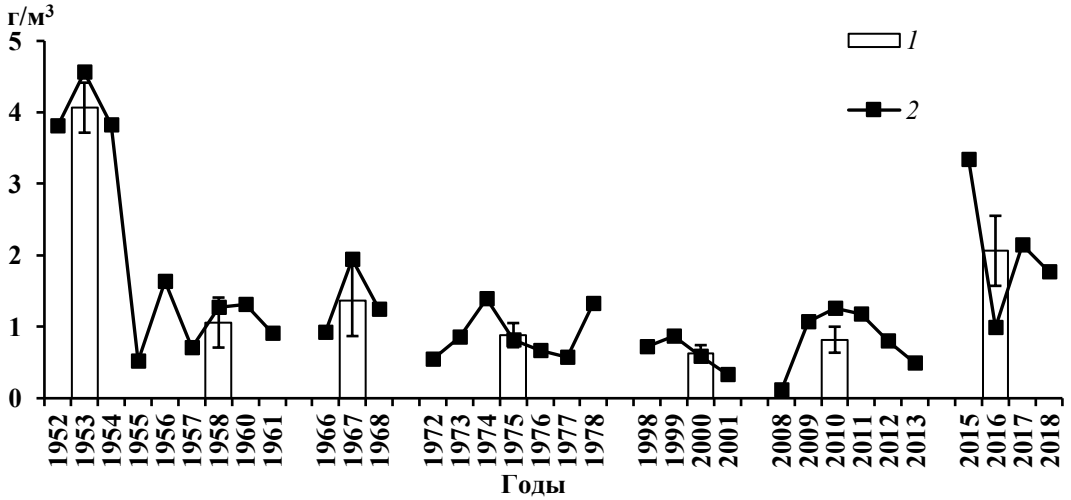

Рис. 3. Многолетняя (1952-2018 гг.) динамика летней (июль-август) биомассы зоопланктона Цимлянского водохранилища. *Условные обозначения:* 1 – средние значения биомассы для периодов 3-7 лет, 2 – средняя биомасса за июль-август каждого года. Источники: 1952 г. (Лившиц, 1954); 1953-1954 гг. (Дзюбан, 1958); 1955-1962 гг. (Кафтанникова, 1965; Шейнин, 1960); 1966-1978 гг. (Гламазда, 1971а, 1974); 1998-2001 гг. (Шевлякова, 2002), 2008-2013 гг. (Свистунова, Саяпин, 2010; Вехов и др., 2014), 2015-2018 гг (Предварительные материалы …, 2018; Голоколенова и др., 2019; данные авторов).

Выводы

В 2018 г. установлено, что основу (60%) численности летнего зоопланктона Цимлянского водохранилища формируют Copepoda, они же доминируют (70%) по биомассе. Наиболее многочисленны понто-каспийская *Heterocope caspia* и вселенцы *Calanipeda aquaedulcis*, *Thermocyclops taihokuensis* и *Acanthocyclops americanus*. Обилие зоопланктона вдвое снижается в направлении от Верхнего участка водохранилища (2.4±0.8 г/м^3) к плотине Цимлянской ГЭС (1.2±0.6 г/м^3). На основе анализа литературных данных за 1952-2018 гг. показано, что биомасса сообщества в последние четыре года (2015-2018 гг.) возросла более чем вдвое (до 2.1±0.5 г/м^3) по сравнению с 40-летним периодом до 2013 г. (0.8±0.1 г/м^3). Современное количество зоопланктона в Цимлянском водохранилище существенно выше по сравнению с другими водохранилищами аридной зоны.

Благодарности. Автор признательна Р.З. Сабитовой за помощь в сборе материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. 1987. Водохранилища. М.: Мысль. 325 с.

Балушкина Е.В., Винберг Г.Г. 1979. Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. Л.: Зоологический институт АН СССР. С. 58-72.

Боруцкий Е.С., Степанова Л.А., Кос М.С. 1991. Определитель Calanoida пресных вод СССР. Л.: Наука. 504 с.

Вехов Д.А. Науменко А.Н., Горелов В.П., Голоколенова Т.Б., Шевлякова Т.П. 2014. Современное состояние и использование водных биоресурсов Цимлянского водохранилища (2009-2013 гг.) // Рыбохозяйственные исследования на водных объектах Европейской части России. СПб.: ГосНИОРХ. С. 116-145.

Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища. 1977. Л.: Гидрометеоиздат. 204 с.

Гламазда В.В. 1969. О полифемидах Цимлянского водохранилища // Гидробиологический журнал. Т. 5. № 5. С. 97-98.

Гламазда В.В. 1971а. Динамика зоопланктона Цимлянского водохранилища (по материалам 1966-1968 гг. // Труды Волгоградского отделения Государственного научно-исследовательского института озерного и

речного рыбного хозяйства (ГосНИОРХ). Т. 5. С. 25-44.

Гламазда В.В. 1971б. О нахождении *Cercopagis pengoi* (Ostr.) в Цимлянском водохранилище // Гидробиологический журнал. Т. 7. № 4. С. 70-71.

Гламазда В.В. 1974. Зоопланктон Цимлянского водохранилища в 1969-1971 гг. // Труды Волгоградского отделения Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства (ГосНИОРХ). Т. 8. С. 29-38.

Голоколенова Т.Б., Горелов В.П., Шевлякова Т.П., Басько Ю.В. 2019. Кормовая база Цимлянского водохранилища в 2016-2018 гг. // Проблемы устойчивого развития и экономической безопасности региона. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Волгоград-Волжский, 10-11 апреля 2019 г. Волгоград: Изд-во ВолГУ. С. 115-121.

Дзюбан Н.А. 1958. Зоопланктон Цимлянского водохранилища // Известия Всесоюзного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства (ВНИРО). Т. 45. С. 51-74.

Кафтанникова О.Г. 1965. Зоопланктон Цимлянского водохранилища по материалам 1955-1962 гг. // Труды Волгоградского отделения Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства (ГосНИОРХ). Т. 1. С. 71-91.

Кружилина С.В., Диденко О.В. 2007. Структурно-функциональные характеристики зоопланктона Кременчугского водохранилища в современный период и его взаимосвязь с некоторыми компонентами фитопланктона // Рибогосподарська наука України. № 2. С. 71-76.

Кутикова Л.А. Коловратки фауны СССР. 1970. Л.: Наука. 744 с.

Лазарева В.И., Сабитова Р.З., Быкова С.В., Жданова С.М., Соколова Е.А. 2018. Распределение летнего зоопланктона в каскаде водохранилищ Волги и Камы // Труды Института биологии внутренних вод РАН. Вып. 83 (86). С. 62-84.

Лившиц Н.М. 1954. Планктон Цимлянского водохранилища по летним сборам 1952 г. // Известия Всесоюзного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства (ВНИРО). Т. 34. С. 61-77.

Малинина Ю.А., Джаяни Е.А., Филинова Е.И., Колозин В.А., Шашуловский В.А. 2016. Оценка темпов многолетних изменений качественных и количественных параметров экосистемы Саратовского водохранилища // Современное состояние биоресурсов внутренних водоемов и пути их рационального использования. Материалы Всероссийской конференции. Казань: Государственно научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства. С. 618-625.

Монченко В.І. 1974. Щелепнороті циклоподібні. Циклопи (Cyclopidae). Киев: Наукова думка. (Фауна України; Т. 27. Вип. 3). 452 с.

Мордухай-Болтовской Ф.Д. 1960. Каспийская фауна в Азово-Черноморском бассейне / Ред. Б.С. Кузин. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 288 с.

Мордухай-Болтовской Ф.Д., Ривьер И.К. 1987. Хищные ветвистоусые Podonidae, Polyphemidae, Cercopagidae и Leptodoridae фауны мира. Л.: Наука. 182 с.

Нечаев Д.Ю. 2016. Фаунистическое разнообразие планктонных беспозвоночных Волго-Ахтубинской поймы // Материалы Всероссийской молодежной гидробиологической конференции «Перспективы и проблемы современной гидробиологии», пос. Борок, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 10-13 ноября 2016 г. / Ред. И.С. Турбанов, Я.С. Климова, С.Ю. Синельников. Ярославль: Филигрань, С. 117–119.

Никаноров А.М., Хоружая Т.А. 2014. Внутриводоемные процессы в крупных водохранилищах юга России (загрязнение, эвтрофирование, токсификация) // География и природные ресурсы. № 2. С. 35-43.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. 2010. Т. 1. Зоопланктон / Ред. В.Р. Алексеев. М.: Товарищество научных изданий КМК. 495 с.

Предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду эксплуатации энергоблока № 1 Ростовской АЭС в 18-месячном топливном циклена мощности реакторной установки 104% от номинальной. Кн. 2. 2018. Гидротехпроект. 504 с. [Электронный ресурс http://old.volgodonskgorod.ru/all/public/pages/dosc/kniga_2_ovos_3_12.18.pdf (дата обращения 26.02.2020)].

Свистунова Л.Д., Саяпин В.В. 2010. Проблема эвтрофирования Цимлянского водохранилища (Ростовская область) и новые данные о его зоопланктоне // Вестник Южного научного центра РАН. Т. 6. № 4. С. 61-67.

Свистунова Л.Д., Брынько В.А., Набоженко М.В. 2014. Современное состояние летнего зоопланктона дельты реки Дон // Вестник Южного научного центра РАН. Т. 10. № 3. С. 75-82.

Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем, проблемы и пути их решения. 2011 / Ред. акад. Г.Г. Матишов. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН. 216 с.

Шевлякова Т.П. 2002. Современное состояние зоопланктона Цимлянского водохранилища (по материалам 1996-2001 гг.) // Рыбохозяйственные исследования в бассейне Волго-Донского междуречья на современном этапе (к 50-летию Волгоградского отделения ГосНИОРХ). СПб.: Квинта Северо-Запад. С. 46-52.

Шейнин М.С. 1960. Зоопланктон Нижнего Дона, его водохранилищ и восточной части Таганрогского залива в годы зарегулированного стока // Труды Азовского научно-исследовательского института рыбного хозяйства (АзНИИРХ). Т. 1. Вып. 1. Ростовское книжное издательство. С. 231-258.

Lazareva V.I. 2020. Distribution of *Eurytemora caspica* Sukhikh et Alekseev, 2013 (Crustacea: Calanoida) in the water reservoirs of the Volga and Don River basins // Crustaceana. Vol. 93. No. 3-5. P. 261-273.

Lazareva V.I., Sokolova E.A. 2015. Metazooplankton of the Plain Reservoir during Climate Warming: Biomass and Production // Inland Water Biology. Vol. 8. No. 3. P. 250-258.

Monchenko V.I. 2008. Redescription of the Oriental *Thermocyclops taihokuensis* (Harada, 1931) (Copepoda: Cyclopoida) from its westernmost population // Zoology in the Middle East. Vol. 43. No. 1. P. 99-104.

Ruttner-Kolisko A. 1977. Suggestion for biomass calculation of planktonic rotifers // Archiv für Hydrobiologie. Ergebn. Limnol. Bd. 8. P. 71-78.

Sukhikh N.M., Alekseev V.R. 2013. *Eurytemora caspica* sp. nov. from the Caspian Sea – one more new species within the *E. affinis* complex (Copepoda: Calanoida, Temoridae) // Proceedings of the Zoological Institute RAS. Vol. 317. No. 1. P. 85-100.

Sukhikh N.M.,Lazareva V.I., Alekseev V.R. 2020. Copepod *Eurytemora caspica* Sukhikh et Alekseev, 2013 (Crustacea, Calanoida) in Volga and Kama River Reservoirs // Inland Water Biology. Vol. 13. No. 2. P. 153-160.

ISSN 1993-3916

ЖУРНАЛ АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ 2021. Т. 27. № 2 (87)

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 апреля 2021 г.

ТОВАРИЩЕСТВО НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ КМК

Формат 60х 84 $^{1}/_{8}$	Объем 21 п.л.
Тираж 200 экз.	Заказ №

Тиражировано в типографии ИП Гаджиева С.С.
367025, Махачкала, ул. Юсупова, 47
RIZO-PRESS, Тел. 8(8722) 68-40-21

Распространяется
только по подписке

Индекс 39775 (каталог «Пресса России»)