

Оригинальная статья

УДК 574.581.5

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-1-64-78>

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В ПОЛУПУСТЫНЕ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ

М. К. Сапанов ✉

Институт лесоведения РАН

Россия, 143030, Московская обл., с. Успенское, ул. Советская, д. 21

Поступила в редакцию 15.02.2021 г., после доработки 24.03.2021 г., принята 26.03.2021 г.

Аннотация. В полупустыне Северного Прикаспия проведен анализ данных погодных условий и мониторинга развития растительных экосистем за 70-летний период. Выявлено постепенное повышение средней температуры воздуха за гидрологический год на 2.73°C (0.039°C/г). До 2000-х гг. ее приращение обеспечивалось за счет потепления холодного периода года, после – теплого периода. Обнаружено повышение количества ежегодных атмосферных осадков в весенне-летний период, главным образом в 1978 – 1995 гг. за счет выпадения в апреле – июне. Динамика коэффициента увлажнения позволяет выделить три периода. Первый период (1951 – 1977 гг.) отличается незначительными колебаниями около среднего значения (0.30), второй период характеризуется хорошим увлажнением (1978 – 1994 гг.), третий период, наоборот, – сильной засушливостью (1995 – 2020 гг.). Эти изменения климата привели к существенной трансформации механизмов формирования снежного покрова, поверхностного стока весенних талых вод и уровня грунтовых вод. Несмотря на такие флуктуации природных условий, ежегодная продуктивность целинной растительности остается в динамически равновесном состоянии, изменяясь во времени волнообразно, без внедрения чужеродных видов. Защитное лесоразведение не имеет шансов на устойчивое развитие из-за потепления зимних месяцев к 2000 г., которое исключило на длительный срок дополнительное увлажнение лесных культур за счет отсутствия снегонакопления и поверхностного притока весенних талых вод. Усыхание древостоев усилилось из-за повторяющихся ежегодно летних атмосферных засух. Производство сельскохозяйственных зерновых культур было прекращено с середины 1990-х гг. вследствие ежегодной их гибели, также из-за засушливости вегетационных сезонов. Потепление климата последних двух десятилетий все более приближает ландшафт равнинной полупустынной территории Северного Прикаспия к исконному целинному состоянию без сельскохозяйственных полей и лесных насаждений. Население региона вынужденно переходит к издревле существовавшему здесь экстенсивному животноводству.

Ключевые слова: аридные территории, потепление климата, травяные сообщества, лесные культуры, сельское хозяйство

Для цитирования. Сапанов М. К. Особенности и экологические последствия потепления климата в полупустыне Северного Прикаспия // Поволжский экологический журнал. 2021. № 1. С. 64 – 78. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-1-64-78>

✉ Для корреспонденции. Лаборатория аридного лесоразведения Института лесоведения РАН.

ORCID и e-mail адрес: <https://orcid.org/0000-0003-0734-5573>, sapanovm@mail.ru (Сапанов Мамай Казиевич).

ВВЕДЕНИЕ

Современное продолжающееся глобальное потепление климата выявляется инструментальными методами и не вызывает сомнений. В связи с этим прогнозируются необратимые природные явления: таяние вечной мерзлоты и ледников, затопление прибрежных территорий, предсказывается климатогенное смещение границ распространения отдельных видов животных и растений. По данным Росгидромета, на территории России в последние десятилетия потепление климата происходило быстрее и масштабнее, чем на остальной части земного шара. Если скорость роста глобальной температуры за 10 лет составила около 0.2°C , то на территории России его приращение было около 0.45°C , а в полярной области – почти 1.0°C за то же время. Проблема потепления климата уже рассматривается как прямой вызов сложившимся производствам и укладу жизни местного населения (Голубятников, Денисенко, 2007; Барталев и др., 2008; Логинов, 2008; Золотокрылин, Титкова, 2010; Lewin, 1985; Ortiz-Bobea, Just, 2013; Li, Yang, 2014; Liu et al., 2014; Alexander, 2016; Christoph, 2016; Clark et al., 2016; Elias et al., 2018)

Между тем исследований собственно влияния, а не прогнозируемого потепления климата на экосистемы суши крайне мало. Это связано, по-видимому, с незначительным количеством длительного инструментального непрерывающегося мониторинга природных ресурсов в течение многих десятилетий (Xu Bo et al., 2020). Именно такой мониторинг дает возможность изучения динамических явлений в экосистемах и выявления достоверных механизмов влияния на них длительно воздействующих климатогенных лимитирующих факторов, в том числе экстремальных. Наиболее часто для индикации существенных изменений региональных погодных-климатических условий и их воздействия на природу судят по динамике радиального прироста деревьев, урожайности зерновых культур, продуктивности травянистых растений, трансформации биоразнообразия, численности популяции животных, а также вегетационного индекса NDVI, который фиксируется по разновременным космическим снимкам (Барталев и др., 2008; Золотокрылин, Титкова, 2010; Liu et al., 2014; Han et al., 2015). При этом во многих случаях приводится констатация факта причинно-следственной зависимости по совпадению сроков разрушающего/созидающего влияния климата на экосистемы, без дальнейшего выявления истинных механизмов его воздействия, притом, что само изменение климата имеет множество сценариев развития, зависящих от скорости приращения тепла в разные месяцы и взаимодействия с выпадающими атмосферными осадками. Складывающийся во времени гидротермический режим территории определяет течение всех физических процессов и развитие организмов, особенно в аридных регионах (Han et al., 2015; Sapanov, 2018). В этой связи рассмотрим климатогенное изменение природы Северного Прикаспия изучением трансформации погодных-климатических условий за 70 лет их инструментального наблюдения, отмечая его влияние во времени на природные процессы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Работа выполнена на Джаныбекском стационаре Института лесоведения РАН, который расположен в северной части Прикаспийском низменности в междуречье

Волги и Урала. Его территория достаточно репрезентативна для ландшафтов суббореальных глинистых полупустынь Северного Прикаспия. В последнее время этот регион относят к опустыненным степям (Сафронова, 2005).

Основой почвенно-растительного покрова территории является трехчленный солонцовый комплекс, в состав которого входят солончаковые солонцы по повышениям микрорельефа, светло-каштановые почвы по микросклонам и лугово-каштановые почвы по западинам. На солонцах произрастают пустынные травяные сообщества, на светло-каштановых почвах – полупустынные, на лугово-каштановых – степные. На территории часто встречаются мезопонижения с лугово-каштановыми почвами, так называемые большие падьины площадью от 1 до 100 га, реже – лиманы и часто – пересыхающие соленые соры. Грунтовые воды засолены и залегают на глубине 4.5 – 7.5 м. Под западинами, падьинами и лиманами под влиянием инфильтрации весенних талых вод, периодически заполняющих эти замкнутые депрессии в рельефе, формируются пресные линзы разной мощности, которые как бы вдавлены в засоленные грунтовые воды и имеют общий уровень (Роде, Польский, 1961; Киссис, 1963; Роде, 1963; Сиземская, 2013).

Коллективом Джаныбекского стационара проводится большая работа по выявлению механизмов воздействия изменения климата на растительные экосистемы и популяции животных (Оловяникова, 2004; Вышивкин, 2010; Сапанов, 2010; Сапанов, 2018). Некоторые полученные достоверные результаты будут обсуждаться в данной работе для представления общего сценария развития природы в Северном Прикаспии с середины XX в.

Погодные условия с 1951 г. анализировались по данным метеорологической станции Жанибек (WMO 34473; 49°24' с.ш., 46°48' в.д.) Казгидромета. Коэффициент увлажнения вычислялся нами как отношение суммы осадков за гидрологический год (с октября предыдущего года по сентябрь следующего включительно) к величине испаряемости за вегетационный сезон. Биологический смысл данного коэффициента заключается в наиболее полном отражении сезонной напряженности погодных условий для живых организмов, так как суммирует используемые ими годовые осадки на фоне потенциальной испаряемости вегетационного периода. Предлагаемый коэффициент аналогичен коэффициенту увлажнения (Реймерс, 1990) и коэффициенту аридности (Penman, 1956). Потенциальная испаряемость определялась по формуле Н. Н. Иванова (1948) с использованием ежемесячных данных средней температуры и относительной влажности воздуха за апрель – сентябрь. Суммарная испаряемость за эти месяцы показывает мощность водного столба, который испарился с открытой водной поверхности за вегетационный сезон.

Направленность и величину тренда погодно-климатических условий устанавливали по знаку и значению коэффициента регрессии уравнений. Подготовительную обработку и анализ данных проводили в приложении Microsoft Office Excel 2000 (Microsoft Corp.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Климат района исследований резкоконтинентальный и засушливый, с преобладанием испаряемости над годовым количеством осадков более чем в три раза. По средним значениям основных климатических факторов видно, что в целом засушливость территории соответствует условиям полупустыни, где потенциальная испаряемость в 3.5 раза превышает количество выпадающих атмосферных осадков (таблица). Отличительным признаком является значительная амплитуда колебаний показателей погоды из года в год.

Средние значения показателей климата Северного Прикаспия за 70-летний период
Table. Average climate data of the Northern Caspian lowland for a 70-year period

Показатели / Index	Период / Period	Значения / Values		
		Средние / Mean	Минимальное / Min	Максимальное / Max
Температура воздуха, °C / Air temperature, °C	Год / Annual	7.6	4.3	10.5
	Октябрь – март / October–March	-3.2	-10.6	1.8
	Апрель – сентябрь / April–September	18.4	16.1	21.6
Атмосферные осадки, мм / Rainfall, mm	Год / Annual	291	150	498
	Октябрь – март / October–March	137	70	227
	Апрель – сентябрь / April–September	154	44	354
Влажность воздуха, % / Air humidity, %	Апрель – сентябрь / April–September	53	36	68
Испаряемость, мм / Evaporation capability, mm	Апрель – сентябрь / April–September	1018	631	1509
Коэффициент увлажнения / Humidity factor	Год / Annual	0.30	0.10	0.79

Коэффициент линейного положительного тренда общего повышения температуры воздуха за гидрологический год равен 0.040, за холодный период – 0.054, за теплый – 0.026 (рис. 1). Как видим, скорость нарастания температуры воздуха в осенне-зимний период в два раза выше, чем в весенне-летний. За 70 лет общая температура воздуха повысилась на 2.73°C (0.039°C/г). Можно было бы ожидать качественного изменения природы Северного Прикаспия при такой скорости потепления, например смены естественной растительности на более ксерофитные виды. В этой связи рассмотрим более подробно сценарий развития природы за последние 70 лет.

Наивысшая скорость нарастания среднемесячной температуры воздуха по результатам линейных уравнений происходит в январе, феврале и марте (коэффициенты регрессии 0.056, 0.081 и 0.089 соответственно), затем в сентябре, октябре и ноябре (0.034, 0.039, 0.035 соответственно), еще ниже в апреле, июне, июле и августе (0.029, 0.020, 0.027, 0.028 соответственно), наименьшая скорость потепления отмечена в мае и декабре (0.017, 0.016 соответственно). Обращает на себя вни-

мание быстрое потепление зимних месяцев (кроме декабря), и умеренное повышение температуры воздуха в период вегетации (особенно в мае).

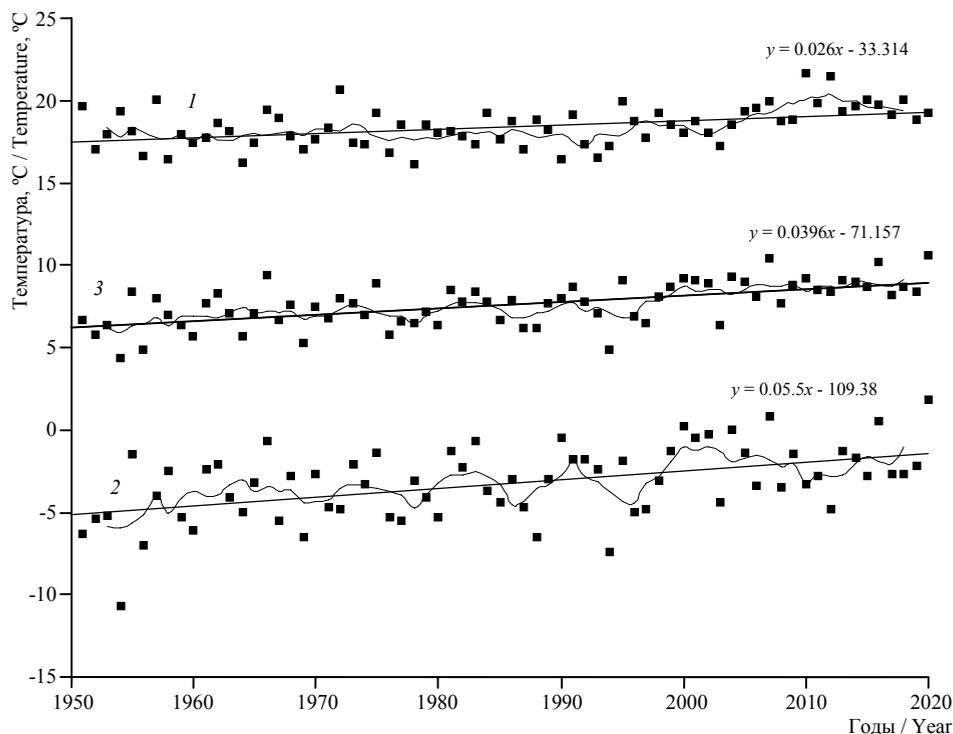


Рис. 1. Динамика значений температуры воздуха: за теплый (1) и холодный (2) полугодия, за гидрологический год (3), их 5-летние скользящие и линейные (с уравнениями) тренды
Fig. 1. Air temperature dynamics: per warm (1) and cold (2) half-year period, per hydrological year (3), and their 5-year moving approximation and linear trends (with equations)

Из рис. 1 видно, что средняя температура воздуха за гидрологический год имеет устойчивую тенденцию к постепенному повышению. Это повышение складывается из средних температур за холодное и теплые полугодия. Динамика их значений, выровненная 5-летними скользящими, показывает, что в холодное полугодие температура повышалась, в основном, в 1951 – 2000 гг. В конце этого периода значения температур приблизились к нулевой отметке (0°C). Затем наметилось длительное зимнее похолодание. И, наоборот, средняя температура воздуха теплого полугодия находилась в динамически равновесном состоянии до 2000-х гг., однако после произошло стремительное ее повышение в течение десятилетия. Как видим, прямолинейный тренд повышения средней годовой температуры воздуха за гидрологический год, до 2000-х гг., поддерживался за счет потепления осенне-зимних месяцев, а в последующем – за счет неуклонного повышения сред-

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

ней температуры воздуха в весенне-летний период на фоне резкого зимнего похолодания. Очевидно, 70-летний интервал изменения температуры воздуха можно условно разделить на два периода (до и после 2000-х гг.), коренным образом отличающихся друг от друга.

Здесь же стоит отметить, что по мере повышения зимних температур воздуха увеличивалась частота ее приближения к нулевой отметке. Такие теплые зимы уменьшают глубину промерзания почвогрунтов и изменяют количество твердых осадков, а также механику снеготранспорта.

Для выявления экологических последствий от регионального потепления климата необходимо учитывать характер выпадения атмосферных осадков. Здесь осадки являются основным источником влагообеспеченности живых организмов, а также только ими пополняются грунтовые воды и водоемы.

Наибольшая скорость нарастания ежемесячного количества осадков за 70-летний период по результатам линейных уравнений приходится на март, апрель, май, июнь, сентябрь и октябрь. Количество осадков оставалось почти неизменным в январе и феврале и, наоборот, немного понизилось в июле, августе и ноябре. С учетом времен года незначительный положительный прямолинейный тренд повышения количества осадков наблюдается в осенне-зимний период и существенное увеличение – в весенне-летний, главным образом, в 1978 – 1995 гг. за счет их выпадения в апреле – июне, т.е. в период вегетации растений (рис. 2).

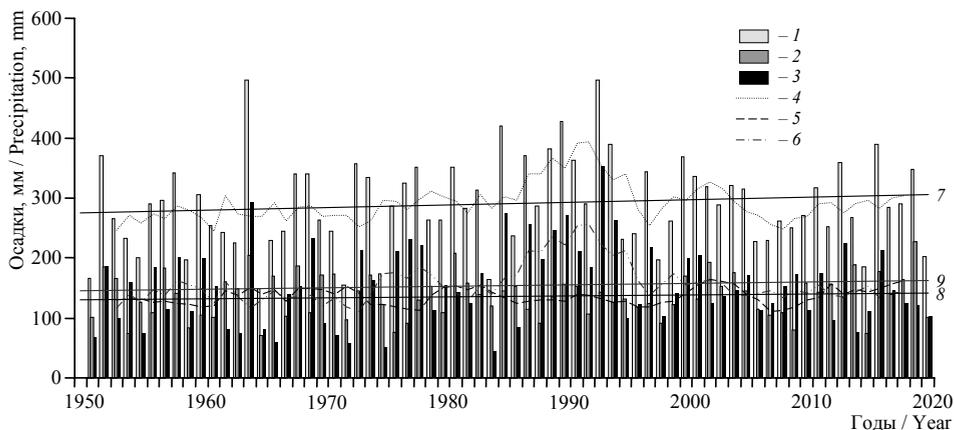


Рис. 2. Динамика сумм осадков в Северном Прикаспии: 1 – 3 – за гидрологический год, за теплый и холодный периоды года, соответственно; 4 – 6 – те же значения, выровненные методом 5-летних скользящих, соответственно; 7 – 9 – прямолинейные тренды тех же значений

Fig. 2. Annual rainfall dynamics in the Northern Caspian lowland: per hydrological year (1), per cold (2) and warm (3) half-year period; 4 – 6: a 5-year moving approximation of previous values; 7 – 9: their linear trends

Изменение климата во времени лучше всего анализировать с учетом основных факторов погодных условий, контролирующих его засушливость в вегетаци-

онный период по динамике коэффициента увлажнения. За 70-летний период исследований его среднее значение равнялось 0.3, минимальное ежегодное – 0.1, максимальное ежегодное – 0.79.

Его прямолинейный незначительный отрицательный тренд во времени указывает на парадоксальное отсутствие сильного ухудшения природных условий по климату, несмотря на значительное потепление (рис. 3). Выравнивание значений 5-летними скользящими выявляет три периода волнообразного характера изменчивости коэффициента увлажнения. Первый период длится до середины 1980-х гг., когда амплитуды колебаний и периоды волн незначительны и колеблются вблизи среднего значения (0.30), второй период характеризуется сильным увлажнением (до конца 1990-х гг.), третий период отличается длительной засушливостью (до конца 2020 гг.).

Как видим, в Северном Прикаспии за 70-летний период произошло существенное изменение климата как в части постепенного повышения температуры воздуха, так и в проявлении особой динамики ежегодной увлажненности территории. Рассмотрим наиболее важные для функционирования живых организмов факторы среды: трансформацию гидрологического режима суши, динамику формирования снежного покрова и особенности возникновения летних засух.

Гидрологический режим территории обусловлен частотой и интенсивностью поверхностного весеннего стока талых вод в понижения рельефа. Такой сток происходит при совпадении нескольких параметров среды: глубокого промерзания почвогрунта, наличия снега и быстрого весеннего снеготаяния. В зависимости от интенсивности стока вначале заполняются мелкие замкнутые понижения в ландшафте (западины), затем более крупные (падины, лиманы). Дальнейшая инфильтрация этой воды в почвогрунт вызывает пополнение существующих под этими де-

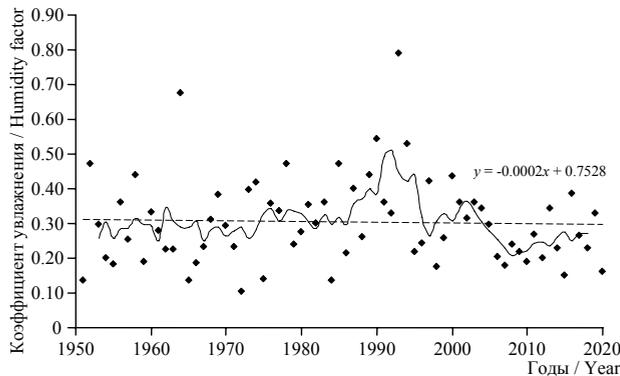


Рис. 3. Динамика коэффициента увлажнения (◆), его 5-летние скользящие (сплошная линия) и линейный (с уравнением) (пунктирная линия) тренды

Fig. 3. Humidity factor dynamics: the annual humidity factor (◆), its 5-year moving approximation (the continuous line) and linear (the dashed line) trends (with equations)

прессиями пресных линз. При значительном поверхностном стоке вода по гидрографической сети заполняет соры и мелководные озера (Роде, 1963; Киссис, 1963; Сапанов, 2018).

По наблюдениям на Джаныбекском стационаре в период с 1950 по 1994 г. сток происходил 10 раз, т.е. каждые 4-5 лет, особенно сильный сток отмечался в 1964 г. В последующие 15 лет (1995 – 2009 гг.) заметного стока не было вообще. В этот период сильно ухудшилась общая обводненность тер-

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

ритории: обмелели немногочисленные реки и озера, пересохли пруды, снизился уровень грунтовых вод суши (Сапанов, 2010). Вновь поверхностный сток наблюдался два года подряд в 2010 – 2011 гг. Впоследствии лишь в некоторые годы талыми водами заполнялись небольшие западины. Длительный перерыв в формировании весеннего стока воды (1995 – 2009 гг.) был обусловлен в основном неглубоким промерзанием почвогрунта в теплые зимы и/или отсутствием других факторов его формирования (Сапанов, 2018; Sapanov, Sizemskaya, 2020).

Инфильтрация талой воды вызывает пополнение пресных линз, которые затем расходятся на ежегодную эвапотранспирацию экосистем. Травяные сообщества расходуют из грунтовых вод около 30 мм, лесонасаждения – более 400 – 600 мм. При длительном отсутствии пополнения пресных линз они постепенно засоляются и исчезают. Особо опасно отсутствие пополнения пресных линз под падьями, занятыми лесонасаждениями, из-за постепенного их истощения, что вызывает уменьшение транспирации древостоев и их гибель от обезвоживания (Киссис, 1963; Сапанов, 2005). Здесь же отметим, что отсутствие пополнения воды в водоемах ухудшает условия жизни местного населения и ограничивает водопой домашних и диких животных (Sapanov, 2018).

Потепление холодного периода года влияет на формирование снежного покрова суши, в части изменения механики метелевого снегопереноса. В теплые зимы снижается или вовсе исключается снегонакопление у препятствий из-за уменьшения количества твердых осадков и их выпадения в виде мокрого снега. В лесных культурах с недоступными грунтовыми водами при отсутствии такого механизма дополнительной влагообеспеченности уже в середине вегетационного сезона у деревьев уменьшается транспирация листьев из-за наступления почвенной засухи. При повторении из года в год таких зим древостои начинают усыхать. Особо опасно их сочетание с летними атмосферными засухами (Сапанов, 2018; Sapanov, Sizemskaya, 2020). Отметим, что без дополнительного почвенного увлажнения здесь могут существовать лишь травянистые виды с укороченным сезонным циклом развития. Очевидно, из-за такого изменения климата широкое внедрение защитного лесоразведения здесь малоперспективно, хотя возможна оптимизация по влагообеспеченности небольших по площади лесонасаждений для использования их на пастбищах и в населенных пунктах (Sapanov, Sizemskaya, 2020).

Во всех целинных сообществах (пустынных, полупустынных и степных) обнаружена достоверная (отрицательная или положительная) корреляционная зависимость их продуктивности от количества осадков за некоторые месяцы холодного полугодия года (определяющих весеннюю влагозарядку почв) и гидротермических показателей весенних месяцев (обеспечивающих интенсивность ростовых процессов растений), а также уровня грунтовых вод (регулирующих доступность этой влаги растениям). Выявленные волнообразные сопряженные тренды динамики урожайности растительного покрова во всех сообществах указывают на их устойчивое динамически-равновесное состояние. Естественные сукцессии, происходящие в них, представляют собой периодическую смену аборигенных доминантов без внедрения чужеродных видов (Оловяникова, 2004; Сапанов, Сиземская, 2010, 2015).

Рассмотрим особенности функционирования сельскохозяйственных культур при таком изменении климата. Регион междуречья Волги и Урала в пределах Северного Прикаспия считается зоной рискованного земледелия, однако сельскохозяйственное зерновое направление здесь успешно развивалось до середины 1990-х гг. (Большаков и др., 1983). В некоторые годы засуха полностью губила посевы на корню (например, в 1972 г. и 1975 г.), в другие – получали средние урожаи (около 10 ц/га), наибольший – был собран в 1978 г. Самыми стабильными и выше средних урожаи были получены в годы повышенного увлажнения (1978 – 1994 гг.). В годы последующих засух все хозяйства, где выращивали зерновые культуры, разорились или перешли на выращивание домашних животных (коров, овец, лошадей), количество которых легко регулируется по запасу ежегодно заготавливаемого корма.

Как видим, постепенное потепление климата в Северном Прикаспии не вызвало необратимых последствий в функционировании естественных целинных экосистем, однако оказало разрушающее воздействие на производственные процессы в виде сокращения площадей сельскохозяйственных посевов и лесных насаждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В научных публикациях в течение многих десятилетий встречаются прогнозы необратимого нежелательного изменения живой природы от потепления климата. Например, прогнозируется дальнейшая климатогенная и антропогенная аридизация засушливых территорий, однако достоверных доказательств наличия причинно-следственной зависимости изменения механизмов функционирования как естественных, так и искусственных экосистем от климата совершенно недостаточно.

В полупустыне Северного Прикаспия междуречья Волги и Урала проведен анализ данных 70-летних инструментальных наблюдений с середины XX в. за погодой и мониторинга особенностей состояния и развития естественных (целина) и искусственных (лесные и зерновые культуры) растительных экосистем.

Выявлено постепенное повышение средней температуры воздуха за гидрологический год на 2.73°C ($0.039^{\circ}\text{C}/\text{г}$). До 2000 г. повышение средней температуры воздуха происходило за счет холодного периода года с постепенным его приближением к нулевой отметке (0°C), после – за счет существенного потепления весенне-летнего периода.

Анализ особенностей выпадения ежегодных атмосферных осадков показал их значительную вариабельность и существенное увеличение в весенне-летний период, главным образом в 1978 – 1995 гг. за счет выпадения в период вегетации растений (апреле – июне).

Выявлен прямолинейный, незначительно отрицательный тренд коэффициента увлажнения с выделением трех периодов волнообразного характера его изменчивости. Первый период длится до середины 1980-х годов, когда амплитуды колебаний и периоды волн коэффициента увлажнения незначительные и колеблются вблизи среднего значения (0.30), второй период (1978 – 1994 гг.) отличается повышенным увлажнением, третий период (1995 – 2020 гг.) характеризуется дли-

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

тельной засушливостью. Эти изменения привели к существенной трансформации механизмов формирования снежного покрова и поверхностного стока весенних талых вод.

Реакция растительных экосистем на все эти природно-климатические флуктуации сильно различается в зависимости от их происхождения. Ежегодная продуктивность естественных пустынных, полупустынных и степных целинных сообществ остается в динамически равновесном состоянии, без внедрения чужеродных видов, изменяясь во времени волнообразно, в соответствии с засушливостью климата.

Лесные культуры, выращиваемые на землях с недоступными грунтовыми водами, стали погибать вследствие перманентной почвенной засухи, вызванной отсутствием ежегодного дополнительного снегонакопления из-за потепления зимних месяцев. Массовое усыхания усилилась при одновременной атмосферной засухе. Лесные культуры, использующие пресные линзы воды, также оказались подвержены усыханию из-за эвапотранспирационного их истощения и засоления вследствие длительного климатогенного отсутствия (в течение 15 лет) весеннего поверхностного притока талых вод.

Получение продукции зерновых культур в регионе всегда было приоритетным направлением ведения сельского хозяйства, хотя и встречались неурожайные годы. Однако их производство необратимо прекратилось совсем с середины 1990-х гг. вследствие ежегодной гибели посевов из-за постоянных атмосферных засух.

Как видим, потепление климата уже изменило уклад жизни местного населения, сделав нерентабельным зерновое направление в сельском хозяйстве и использование лесных культур, вследствие чего пасторальный ландшафт полупустыни Северного Прикаспия начал приобретать исконный безлесный облик, издревле присущий землям с экстенсивным животноводством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С. А., Жижин М. Н., Лупян Е. А., Матвеев М. Ю., Матвеев А. М., Медведева М. А., Савин И. Ю., Толтин В. А. Возможности исследований влияния изменений климата на состояние растительного покрова : концепция проекта CLIVT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5, № 2. С. 272 – 278.

Большаков А. Ф., Эрперт С. Д., Шейнин Л. Б. Пути сельскохозяйственного освоения полупустыни. М. : Наука, 1983. 72 с.

Вышивкин А. А. Изменение растительности солонцового комплекса Северного Прикаспия вследствие флуктуации климата и прекращения выпаса // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 78 – 82.

Голубятников Л. Л., Денисенко Е. А. Модельные оценки влияния изменений климата на ареалы зональной растительности равнинных территорий России // Известия РАН. Серия биологическая. 2007. № 2. С. 212 – 228.

Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. Климатообусловленная динамика лесостепной, степной и полупустынной растительности России и Казахстана // Известия РАН. Серия географическая. 2010. № 2. С. 40 – 48.

Иванов Н. Н. Ландшафтно-климатические зоны Земного шара. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1948. 224 с.

Киссис Т. Я. Водный режим темноцветной черноземовидной почвы большой падины под древесным насаждением // Водный режим почв полупустыни. М. ; Л. : Изд-во АН СССР. 1963. С. 84 – 126.

Логинов В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата : причины и следствия. Минск : ТетраСистемс, 2008. 496 с.

Оловянная И. Н. Динамика продуктивности растительного покрова в Заволжской глинистой полупустыне // Ботанический журнал. 2004. Т. 89, № 7. С. 1122 – 1137.

Реймерс Н. Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М. : Мысль, 1990. 637 с.

Роде А. А. Водный режим и баланс целинных почв полупустынного комплекса // Водный режим почв полупустыни. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1963. С. 5 – 83.

Роде А. А., Польский М. Н. Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Труды Почвенного института им. В. В. Докучаева. 1961. Т. 56. С. 3 – 214.

Сапанов М. К. Причины усыхания культур дуба черешчатого на гидроморфных лугово-каштановых почвах Северного Прикаспия // Лесоведение. 2005. № 5. С. 10 – 17.

Сапанов М. К. Влияние изменения климата на обводненность Северного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16, № 5. С. 25 – 30.

Сапанов М. К. Метелевое переотложение снега как основной фактор регулирования влагообеспеченности лесных культур в степных условиях // Поволжский экологический журнал. 2018. № 3. С. 327 – 339.

Сапанов М. К., Сиземская М. Л. Климатогенные изменения травянистой растительности на солончаковых солонцах Северного Прикаспия // Поволжский экологический журнал. 2010. № 2. С. 185 – 194.

Сапанов М. К., Сиземская М. Л. Изменение климата и динамика целинной растительности в Северном Прикаспии // Поволжский экологический журнал. 2015. № 3. С. 307 – 320.

Сафронова И. Н. Об опустыненных степях Нижнего Поволжья // Поволжский экологический журнал. 2005. № 3. С. 261 – 267.

Сиземская М. Л. Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2013. 276 с.

Alexander L. V. Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes : A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond // Weather and Climate Extremes. 2016. Vol. 11. P. 4 – 16.

Elias E., Reyes J., Steele C., Rango A. Diverse landscapes, diverse risks : Synthesis of the special issue on climate change and adaptive capacity in a hotter, Drier Southwestern United States // Climatic Change. 2018. Vol. 148, iss. 3. P. 339 – 353.

Christoph S. Climate extremes heat waves to come // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6. P. 128 – 129.

Clark M. P., Wilby R. L., Gutmann E. D., Vano J. A., Gangopadhyay S., Wood A. W., Fowler H. J., Prudhomme C., Arnold J. R., Brekke L. D. Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change // Current Climate Change Report. 2016. Vol. 2, iss. 2. P. 55 – 64.

Han F., Zhang Q., Buyantuev A., Niu J., Liu P., Li X., Kang S., Zhang M., Li Y. Effects of climate change on phenology and primary productivity in the desert steppe of Inner Mongolia // Journal of Arid Land. 2015. Vol. 7, iss. 2. P. 251 – 263.

Lewin R. Plant communities resist climatic change // Science. 1985. Vol. 228. P. 165 – 166.

Li H., Yang X. Temperate dryland vegetation changes under a warming climate and strong human intervention – with a particular reference to the District Xilin Gol, Inner Mongolia, China // CATENA. 2014. Vol. 119. P. 9 – 20.

Liu Y., Yu D., Su Y., Hao R. Quantifying the effect of trend, fluctuation and extreme event of climate change on ecosystem productivity // Environmental Monitoring and Assessment. 2014. Vol. 186, iss. 12. P. 8473 – 8486.

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Ortiz-Bobea A., Just R. E. Modeling the structure of adaptation in climate change impact assessment // *American Journal of Agricultural Economics*. 2013. Vol. 95, iss. 2. P. 244 – 251.

Penman H. L. Estimating evaporation // *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. 1956. Vol. 37, № 1. P. 43 – 50.

Sapanov M. K. Environmental implications of climate warming for the Northern Caspian region // *Arid Ecosystems*. 2018. Vol. 8, iss. 1. P. 13 – 21.

Sapanov M. K., Sizemskaya M. L. Climatogenic restrictions of arid forestry // *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. Vol. 13, № 7. P. 788 – 794.

Xu Bo, Hujiltu M., Baoyin T., Zhong Y., Bao Q., Zhou Y., Liu Z. Rapid loss of leguminous species in the semi-arid grasslands of Northern China under climate change and mowing from 1982 to 2011 // *Journal of Arid Land*. 2020. Vol. 12, iss. 5. P. 752 – 765.

Peculiarities and ecological consequences of climate warming in the Northern Caspian semi-desert

М. К. Сапанов ✉

*Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences
21 Sovetskaya St., village Uspenskoe, Moscow region 143030, Russia*

Received: 15 February 2021 / revised: 24 March 2021 / accepted: 26 March 2021

Abstract. Data on the weather conditions and monitoring of vegetation ecosystems in the Northern Caspian semi-desert for the 70-year period were analyzed. A gradual increase in the average air temperature per hydrological year by 2.73°C (0.039°C/year) has been revealed. Before and after the 2000s its increase was caused by warming of the cold and warm period of the year, respectively. An increase of the annual atmospheric precipitation in the spring-summer period was detected, mainly in 1978–1995 due to April-June precipitation. The humidification coefficient dynamics allows distinguishing three periods. The first period (1951–1977) is characterized by insignificant fluctuations around the average value (0.30); the second period (1978–1994) is characterized by good moisture, and the third period (1995–2020), on the contrary, – by severe aridity. These climate changes have led to significant transformation of the snow cover formation mechanisms, the surface runoff of spring melt water, and the ground water level. Despite such fluctuations of natural conditions, the annual productivity of virgin vegetation remains in dynamic equilibrium, changing over time in a wave-like manner, with no introduction of heterogeneous species. The protective afforestation has no chance for sustainable development due to warming of the winter months by 2000, which led to the absence of additional moistening of forest crops for a long period due to the deficiency of snow accumulation and surface inflow of spring melt water. The shrinkage of forest stands was intensified by recurrent annual summer atmospheric droughts. The production of agricultural crops was discontinued since the mid-1990s due to their annual failure, as well as the aridity of the growing seasons. The climate warming of the last two decades has brought the landscape of the flat semi-desert territory of the Northern Caspian region ever closer to its original state without agricultural fields and forest plantations. The population of the region is forced to return to extensive cattle breeding, which has existed here since ancient times.

Keywords: arid territories, climate warming, grass communities, forest stands, agriculture

For citation: Sapanov M. K. Peculiarities and ecological consequences of climate warming in the Northern Caspian semi-desert. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 1, pp. 64–78. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-1-64-78>

REFERENCES

Bartalev S. A., Zhizhin M. N., Lupyan E. A., Matveev M. Yu., Matveev A. M., Medvedeva M. A., Savin I. Yu., Tolpin V. A. Possibilities of researching the influence of climate change on the state of vegetation: The concept of the CLIVT project. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*, 2008, vol. 5, no. 2, pp. 272–278 (in Russian).

✉ Corresponding author. Laboratory of Arid Forestry, Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: <https://orcid.org/0000-0003-0734-5573>, sapanovm@mail.ru (Mamay K. Sapanov).

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Bolshakov A. F., Erpert S. D., Sheinin L. B. *Puti sel'skokhozyaystvennogo osvoyeniya polupustyni* [Ways of Semidesert Agricultural Development]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 72 p. (in Russian).

Vyshivkin A. A. Changes in the vegetation of the solonetz complex of the Northern Caspian region due to climate fluctuations and cessation of grazing. *Geography and Natural Resources*, 2010, no. 1, pp. 78–82 (in Russian).

Golubyatnikov L. L., Denisenko E. A. Model estimates of climate change impact on habitats of zonal vegetation for the plain territories of Russia. *Biology Bulletin*, 2007, vol. 34, no. 2, pp. 170–184.

Zolotokrylin A. H., Titkova T. B. Climate-caused regional dynamics of forest-steppe, steppe and semi-desert vegetation in Russia and Kazakhstan. *Izvestiya RAN, Seriya Geograficheskaya*, 2010, no. 2, pp. 40–48 (in Russian).

Ivanov N. N. *Landshaftno-klimaticheskiye zony Zemnogo shara* [Landscape and Climatic Zones of the Earth]. Moscow, Leningrad, Izdatel'stvo AN SSSR, 1948. 224 p. (in Russian).

Kissis T. Ya. Water regime of dark-colored chernozem-like soil of a large depression under a tree plantation. In: *Vodnyy rezhim pochv polupustyni* [Water Regime of Semi-desert Soils]. Moscow, Leningrad, Izdatel'stvo AN SSSR, 1963, pp. 84–126 (in Russian).

Loginov V. F. *Global'nyye i regional'nyye izmeneniya klimata: prichiny i sledstviya* [Global and Regional Climate Changes: Causes and Consequences]. Minsk, TetraSystems Publ., 2008. 496 p. (in Russian).

Olovyannikova I. N. The dynamics of productivity of vegetation cover in Transvolga clay semidesert. *Botanicheskii Zhurnal*, 2004, vol. 89, no. 7, pp. 1122–1137 (in Russian).

Reymers N. F. *Prirodopol'zovaniye. Slovar'-spravochnik* [Nature Management. Reference dictionary]. Moscow, Mysl' Publ., 1990. 637 p. (in Russian).

Rode A. A. Water regime and balance of virgin soils of the semi-desert complex. In: *Vodnyy rezhim pochv polupustyni* [Water Regime of Semi-desert Soils]. Moscow, Leningrad, Izdatel'stvo AN SSSR, 1963, pp. 5–83 (in Russian).

Rode A. A., Pol'skii M. N. Soils of the Dzhanybek station: Their morphological structure, texture, chemical composition, and physical properties. *Proceedings of the V. V. Dokuchaev Soil Science Institute*, 1961, vol. 56, pp. 3–214 (in Russian).

Sapanov M. K. Causes of drying up of *Quercus robur* plantations on hydromorphic meadow-chestnut soils in the Northern Caspian Sea region. *Lesovedenie*, 2005, no. 5, pp. 10–17 (in Russian).

Sapanov M. K. The impact of climate change on the water cut in the Northern Caspian region. *Arid Ecosystems*, 2010, vol. 16, no. 5, pp. 25–30 (in Russian).

Sapanov M. K. Snow-drift redistribution as the main factor of regulation of water availability for forest cultures in steppe conditions. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2018, no. 3, pp. 327–339 (in Russian).

Sapanov M. K., Sizemskaya M. L. Climate-caused changes in the herbaceous vegetation on solonchakous solonchaks of the Northern Caspian Lowland. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2010, no. 2, pp. 185–194 (in Russian).

Sapanov M. K., Sizemskaya M. L. Climate changes and the virgin vegetation dynamics in the Northern Caspian Lowland. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2015, no. 3, pp. 307–320 (in Russian).

Safronova I. N. On deserted steppes of the Lower Volga region. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2005, no. 3, pp. 261–267 (in Russian).

Sizemskaya M. L. *Sovremennaya prirodno-antropogennaya transformatsiya pochv polupustyni Severnogo Prikaspiya* [The Modern Natural-anthropogenic Transformation of the Soils of the Semidesert of the Northern Caspian]. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2013. 276 p. (in Russian).

Alexander L. V. Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes*, 2016, vol. 11, pp. 4–16.

Elias E., Reyes J., Steele C., Rango A. Diverse landscapes, diverse risks: Synthesis of the special issue on climate change and adaptive capacity in a hotter, Drier Southwestern United States. *Climatic Change*, 2018, vol. 148, iss. 3, pp. 339–353.

Christoph S. Climate extremes heat waves to come. *Nature Climate Change*, 2016, vol. 6, pp. 128–129.

Clark M. P., Wilby R. L., Gutmann E. D., Vano J. A., Gangopadhyay S., Wood A. W., Fowler H. J., Prudhomme C., Arnold J. R., Brekke L. D. Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. *Current Climate Change Report*, 2016, vol. 2, iss. 2, pp. 55–64.

Han F., Zhang Q., Buyantuev A., Niu J., Liu P., Li X., Kang S., Zhang M., Li Y. Effects of climate change on phenology and primary productivity in the desert steppe of Inner Mongolia. *Journal of Arid Land*, 2015, vol. 7, iss. 2, pp. 251–263.

Lewin R. Plant communities resist climatic change. *Science*, 1985, vol. 228, pp. 165–166.

Li H., Yang X. Temperate dryland vegetation changes under a warming climate and strong human intervention – with a particular reference to the District Xilin Gol, Inner Mongolia, China. *CATENA*, 2014, vol. 119, pp. 9–20.

Liu Y., Yu D., Su Y., Hao R. Quantifying the effect of trend, fluctuation and extreme event of climate change on ecosystem productivity. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, iss. 12, pp. 8473–8486.

Ortiz-Bobea A., Just R. E. Modeling the structure of adaptation in climate change impact assessment. *American Journal of Agricultural Economics*, 2013, vol. 95, iss. 2, pp. 244–251.

Penman H. L. Estimating evaporation. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 1956, vol. 37, no. 1, pp. 43–50.

Sapanov M. K. Environmental implications of climate warming for the Northern Caspian region. *Arid Ecosystems*, 2018, vol. 8, iss. 1, pp. 13–21.

Sapanov M. K., Sizemskaya M. L. Climatogenic restrictions of arid forestry. *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, vol. 13, no. 7, pp. 788–794.

Xu Bo, Hujiltu M., Baoyin T., Zhong Y., Bao Q., Zhou Y., Liu Z. Rapid loss of leguminous species in the semi-arid grasslands of Northern China under climate change and mowing from 1982 to 2011. *Journal of Arid Land*, 2020, vol. 12, iss. 5, pp. 752–765.