АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2024, том 30, № 2 (99), с. 12-23

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 551.582

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ ОСТРОВНЫХ СТЕПЕЙ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. И.Е. Трофимова, А.С. Балыбина

Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 1. E-mail: balybina@irigs.irk.ru

Поступила в редакцию 01.09.2023. После доработки 30.11.2023. Принята к публикации 01.12.2023.

Обсуждаются результаты исследования многолетних климатических условий в системе «приземный слой воздуха – почва» в островных степях юга Восточной Сибири. Отмечено, что на фоне увеличения суровости зим и континентальности климата приземной атмосферы в направлении с северо-запада на юго-восток в том же направлении усиливается зимнее охлаждение почвы, а летнее прогревание незначительно повышается. Зафиксированы существенные различия годовой амплитуды температуры почвы на глубинах в территориально разобщенных между собой островных степях. Самые высокие её значения – в Южном Забайкалье, что соответствует резко континентальному климату почв. На основе многолетних рядов средней годовой температуры воздуха и почвы и суммы атмосферных осадков за год определены тенденции их изменений в последние десятилетия. Величины линейных трендов температуры воздуха и почвы практически везде положительные, а для многолетних их рядов характерна хорошая согласованность. Атмосферные осадки Южного Забайкалья имеют тенденцию к уменьшению, в Предбайкалье незначительный линейный тренд имеет как положительный, так и отрицательный знаки.

Ключевые слова: островные степи юга Восточной Сибири, температура воздуха и почвы, атмосферные осадки, региональные изменения показателей климата, Предбайкалье, Забайкалье, тренд.

DOI: 10.24412/1993-3916-2024-2-12-23
EDN: QYVGJB

Степные ландшафты юга Восточной Сибири – это особое природное явление в сплошном поясе евроазиатских степей. Здесь они не образуют сплошной широтной полосы, а занимают лишь разные по площади участки или «острова». Их отличительное свойство – тесная взаимосвязь с таежными ландшафтами (Михеев, 2001). На рассматриваемой территории активное изучение степных растительных сообществ, почвенного покрова и других компонентов ландшафта началось уже в первые десятилетия XX века. В настоящее время большое внимание уделяется изменениям компонентов степных ландшафтов (рельефа земной поверхности, воздушных масс, почвы, растительности и др.), которые связаны в основном с климато-антропогенной трансформацией. Большое научное и практическое значение имеет тот факт, что в данном регионе географическое распространение ландшафтов того или иного типа (степные, лесостепные, таежные, горно-таежные) или их компонентов получило картографическое отображение. Единая форма представления картографического материала (легенды карт) дает возможность проводить сравнительный анализ имеющейся информации о природных системах, что позволяет визуально оценивать их особенности и разнообразие всего юга Восточной Сибири.

При достаточно большом количестве региональных оценок компонентов степных ландшафтов или их свойств, в т.ч. климата приземного слоя атмосферы, недостаточно изучен термический режим почвенной (почвенно-грунтовой) толщи. Вместе с тем он является интегральным показателем эколого-климатических ресурсов территории и может использоваться как важная характеристика влияния на многие природные процессы. Это и определило направление исследований: дать количественную оценку средних многолетних термических режимов почвенной толщи и рассмотреть закономерности их распределения в территориально разобщенных между собой островных степях юга Восточной Сибири. Выявить тенденции климатических изменений в системе

«приземный слой воздуха – почва» и соотнести их с изменениями компонентов ландшафта.

Материалы и методы

Территория исследований – юг Восточной Сибири: Предбайкалье, Прибайкалье, Южное Забайкалье (рис. 1).

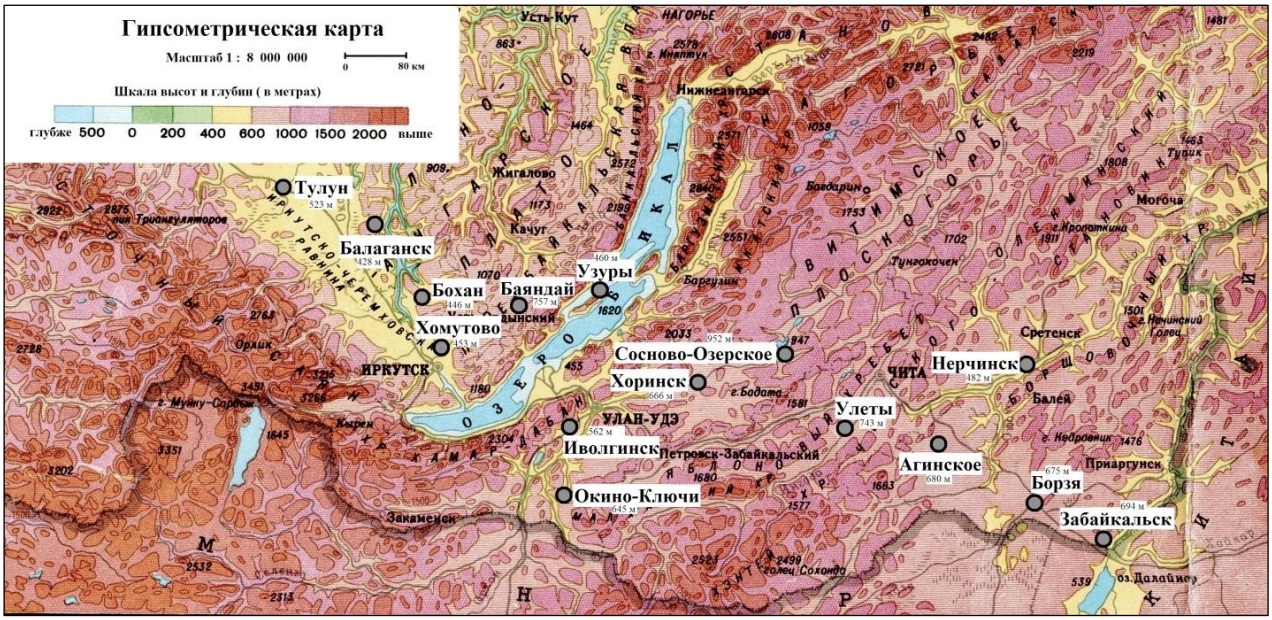


Рис. 1. Территория исследования островных степей юга Восточной Сибири (гипсометрическая основа – карта-врезка (Растительность, 1972)) и расположение метеорологических станций. *Условные обозначения:* серыми кружками (Бохан) обозначены метеостанции по данным которых проводился анализ, мелким шрифтом рядом (446 м) – высота местности для них в метрах над уровнем моря, БС.

Здесь островные степи простираются с северо-запада (юг Средне-Сибирского плоскогорья, Приольхонье и байкальский остров Ольхон) на юго-восток (забайкальские котловины Селенгинского среднегорья, Онон-Аргунское нагорно-равнинное пространство). На рассматриваемой территории степные ландшафты имеют широкое разнообразие. К ним относятся североазиатские (подгорные южносибирские) и центральноазиатские (горные западнозабайкальские даурского типа, высоких равнин и денудационных останцов онон-аргунские гемикриофильные; Ландшафты …, 1977). Преобладают в основном черноземы, черноземовидные и каштановые почвы. По гранулометрическому составу они весьма разнообразны. Встречается сложное чередование слоев почвенно-грунтовой толщи: суглинки, супеси, пески с включением гальки, щебенки, камней и даже мелких валунов (Атлас Республики …, 2000; Атлас …, 2004; Экологический атлас …, 2015).

Естественно, наши исследования многолетнего термического режима почвенной толщи мощностью 0.2-3.2 м не охватывают все возможные варианты степных ландшафтов. Для его количественной оценки использовались опубликованные данные наблюдений на нескольких метеорологических станциях Иркутского и Забайкальского территориальных управлений по гидрометеорологии и контролю природной среды. С целью сопоставления полученных результатов для разобщенных степных территорий юга Восточной Сибири нами взята информация о температуре почвенной толщи за один и тот же период наблюдений: из метеорологических ежемесячников за 1978-1989 гг. взяты данные для оценки вертикальных температурных профилей по всем метеостанциям, представленным на рисунке 1 (Метеорологический ежемесячник, 1978-1989). В процессе обработки и анализа данных применялась единая методика, получившая развитие при выполнении подобных исследований (Трофимова, Балыбина, 2016; Балыбина, Трофимова, 2022). Её ключевые моменты описываются далее. Из характеристик летнего прогревания и зимнего охлаждения почвенного профиля взяты средние месячные значения максимальной и минимальной в годовом цикле температуры на стандартных глубинах измерения. На основе сформированного

массива данных строятся вертикальные профиля температуры почвы, по которым проводится оценка её дифференциации в пространстве.

Важное место в работе отведено анализу временных рядов средней годовой температуры воздуха и почвы на глубине 40 см, сумм атмосферных осадков за год в последние десятилетия. Для этого воспользовались базой данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (Булыгина и др., 2021). Выбрано семь метеостанций за период с 1985 по 2020 гг .: Баяндай, Балаганск, Тулун, Тайшет, Агинское, Борзя, Сосново-Озерское. В работе применялись методы статистического и географического анализа. Корреляционный анализ использовался для получения информации о согласованности рядов атмосферных осадков, температуры воздуха и почвы. Определение тенденций долгосрочных изменений показателей рассчитывалось методом наименьших квадратов. Оценка надежности (статистической значимости) коэффициентов корреляции проводилась по критерию Стьюдента на 90% уровне вероятности. Изменения тренда аппроксимированы линейной функцией $Y = a + bX$, где b – угловой коэффициент, измеряющий темп динамики параметра, a – свободный член (значение Y при $X = 0$), X – независимая переменная, Y – искомая переменная.

Результаты и обсуждение

Региональные климатические условия. Климатоформирующие процессы, определяющие региональный климат, не являются обособленными, а находятся в общей системе глобального уровня. Подробное описание основных факторов, формирующих региональный климат на обширной территории Сибири, дано в работе И.Е. Трофимовой с соавторами (2019). Формирование климата связано с её внутриматериковым расположением в большом удалении от морей и океанов и значительной приподнятостью над уровнем моря. Регион находится на стыке взаимодействия разнородных воздушных масс, поступающих с Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов, имеющих разную степень влияния на региональный климат. На юго-восточную часть территории летом с юга периодически выносится теплый и влажный воздух, который в условиях циклонической деятельности вызывает обильные дожди. С макроциркуляционными условиями связаны барические образования над поверхностью земли. Среди них большое значение имеет господство в большей части года Азиатского антициклона, а также резкая смена синоптической ситуации. К фактору влияния на формирование климата относится орографическое устройство земной поверхности, которое существенно различается в пределах рассматриваемой территории.

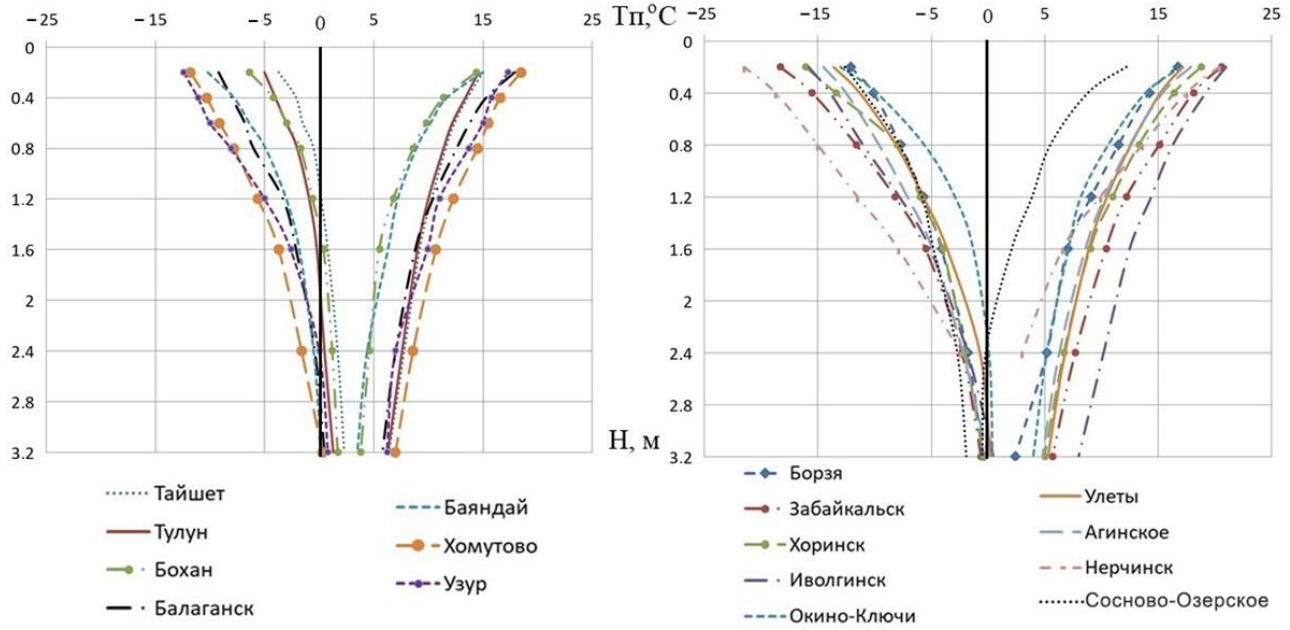
В Предбайкалье и Прибайкалье находятся крупные как положительные, так и отрицательные формы рельефа. В Южном Забайкалье большей части территории свойствен горно-котловинный характер рельефа, представленный чередованием множеством низких и средневысотных хребтов и равнинных котловин забайкальского типа. На юго-восточной окраине рассматриваемой территории располагаются нагорья и всхолмленные высокие равнины (рис. 1). Кроме того, юг Восточной Сибири отличается значительным ресурсом лучистой энергии. Здесь отмечается увеличение продолжительности солнечного сияния в направлении с северо-запада на юго-восток на 410 ч/год. В этом направлении также наблюдается увеличение суммарной радиации и радиационного баланса практически в 1.2-1.3 раза.

На юге Восточной Сибири отмечено многообразие климатов, имеющих неодинаковую степень континентальности. Если в Предбайкалье он умеренно или резко континентальный, то в Южном Забайкалье преобладает резко континентальный климат, а умеренно континентальный и суперконтинентальный характерен только для отдельных географических пространств. Неравномерно распределяются по земной поверхности и атмосферные осадки. При общем небольшом количестве выпадающих осадков (за исключением горных хребтов) характерно их уменьшение с северо-запада на юго-восток. Важная характеристика климата – аридность, которая определяется по коэффициенту увлажнения (КУВ). Для значительной части территории Восточной Сибири он рассчитывался по данным большого количества метеостанций (и не только в степных ландшафтах). В порядке усиления степени аридности здесь выделены несколько ареалов (зон): «1 – неаридные избыточного постоянного увлажнения с КУВ > 1.0; 2 – дисперсно-аридные оптимального увлажнения с КУВ 0.6-1.0; 3 – слабоаридные недостаточного увлажнения с КУВ 0.5-0.6; 4 – умеренно и среднеаридные с КУВ 0.3-0.5» (Михеев, 2001, с. 133). Для юга Восточной Сибири характерны все отмеченные градации КУВ, но выделенные ареалы занимают разные по площади участки. Лесостепи

и степи рассматриваемой территории функционируют при увлажнении с величинами КУВ от 0.4 до 0.6. Поскольку особенности климатических условий территории зависят от получаемого ею тепла и влаги, то по их соотношению выделены типы климата: летом – влажный или недостаточно влажный, умеренно теплый, зимой – умеренно суровый, малоснежный или снежный (Будыко, 1971).

На общеклиматическом фоне формирование островных степей на юге Восточной Сибири обусловлено факторами азонального характера – литолого-геоморфологическими условиями, на которые накладываются климатические особенности конкретной местности.

Среднее многолетнее термическое состояние почв. На формирование температурного режима почвы существенное влияние оказывает комплекс природных факторов. К важным климатическим параметрам, определяющим температуру почвы, относятся температура приземного слоя воздуха и толщина снежного покрова. На рассматриваемой территории температура почвы изменяется в широком диапазоне, поэтому построенные температурные профиля (рис. 2) делятся на группы, которые соотносятся с соответствующими группами климатических условий (табл. 1).



а) б)

Рис. 2. Вертикальное (Н, м – глубина разреза) распределение многолетней среднегодовой минимальной и максимальной температуры почвы (Тп, °С) в степных ландшафтах юга Восточной Сибири. *Условные обозначения:* а) – Предбайкалье и Прибайкалье, б) – Южное Забайкалье.

В степных ландшафтах Предбайкалья и Прибайкалья многолетняя среднегодовая минимальная температура почвы в самом верхнем слое (0.2 м) варьирует от -3.7 до -12.5°С, а на глубине 3.2 м – от +2.3 до 0°С (рис. 2а).

Менее всего охлаждается почвенная толща локальных степных участков, расположенных на Иркутско-Черемховской равнине (Тайшет, Тулун), а также на южной окраине Лено-Ангарского плато (Бохан; группа $I_{П}$). Хотя они разобщены пространственно, но температурные различия между ними незначительные. Здесь слабое зимнее охлаждение характеризуется неглубоким (1.0-1.6 м) сезонным промерзанием, которое опускается до глубины 0.4 м в ноябре-апреле и до 0.8 м в январе-апреле. Отмеченные особенности зимнего термического режима почв в данных местоположениях определяются показателями климата, имеющими достаточно широкий диапазон (табл. 1, группа $I_{П}$).

Температурные профили почвенной толщи в степных ландшафтах, простирающихся узкой полосой по юго-западному побережью Байкала и расположенных на байкальском острове Ольхон (Узур) и на территории Лено-Ангарского плато (Хомутово, Баяндай, Балаганск), характеризуют её более сильное охлаждение (группа $II_{П}$). Сезонное промерзание здесь достигает 2.6-3 м, которое

сохраняется до 0.4 м в ноябре-апреле и до 0.8 м – в декабре-апреле. В этих местоположениях зимнее охлаждение почвенной толщи определяют более низкие значения показателей климата, находящиеся в менее широком диапазоне (табл. 1, группа $II_П$). В этой группе исключение составляют степи байкальского о. Ольхон, испытывающего отепляющее влияние зимнего Байкала. Здесь температура воздуха в январе составляет -19.8°С, а ΣТв < -10°С – -1815°С, к тому же толщина снежного покрова составляет лишь 13 см, а почва – черноземовидная суглинистая со щебенчатым включением, что отличает ее от почв других метеостанций, входящих по температуре почвы в одну группу.

Таблица 1. Сезонные показатели климата на исследуемой территории.

Регион	Группы по градациям	Показатели климата					
		Зима			Лето		
		T_I, °С	ΣТ< -10°С	h, см	T_{VII}, °С	ΣТ > 10°С	$ΣP_{IV-X}$, мм
Предбайкалье и Прибайкалье	$I_П$	От -19.5 до -25.5	От -1940 до -2830	24-30	16.8-17.9	1420-1526	288-295
	$II_П$	От -22.9 до -27.0	От -2527 до -2995	17-23	17.0-18.5	1520-1677	281-317
Южное Забайкалье	$I_З$	-31.6	-3460	14	17	1330	286
	$II_З$	-28.4	-3015	12	20.2	1925	269
	$III_З$	-25.4	-2905	8	19.4-20.0	1814-1946	261-275
	$IV_З$	От -21.0 до -28.4	От -2165 до -3025	3-12	18.2-19.0	1724-1751	215-335

Примечания к таблице 1: T_I, °С – многолетняя среднемесячная температура воздуха в январе, T_{VII} – многолетняя среднемесячная температура воздуха в июле, $ΣP_{IV-X}$ – сумма атмосферных осадков с апреля по октябрь, h – высота снежного покрова.

В степных ландшафтах Южного Забайкалья средняя месячная минимальная температура почвенной толщи отличается большим разнообразием (рис. 2б). Её значения на глубине 0.2 м находятся в пределах от -11.5°С до -21.5°С, на 0.8 м – в пределах от -5.6°С до -15.0°С. Самое сильное охлаждение всей почвенной толщи относится к метеостанции Нерчинск, расположенной в степном котловинно-долинном образовании при слиянии рек Шилка и Нерча (группа $I_З$). Сезонное промерзание проникает несколько глубже – до 3.2 м. Продолжительность нахождения сезонной мерзлоты в слое до 0.4 м составляет около 6 месяцев. Данный температурный режим почв определяют весьма суровые зимние условия (табл. 1, группа $I_З$). Самое слабое зимнее охлаждение почвенной толщи (группа $II_З$) относится к Бичурской степной котловине (Окино-Ключи), которая расположена на значительном расстоянии от ситуации Шилка-Нерча. В данной котловине сезонное промерзание почвенной толщи не опускается глубже 2.4 м, а сезонная мерзлота до 0.8 м держится около 5 месяцев. Однако температурные показатели приземного слоя воздуха здесь достаточно низкие (табл. 1, группа $II_З$). Особый температурный режим почвенной толщи (группа $III_З$) присущ луговой степи в Еравнинской котловине (Сосново-Озерское), расположенной на южной окраине Витимского плоскогорья. В ней охлаждение почвенной толщи до глубины 0.8 м близко к ситуации Окино-Ключи, глубже отрицательная температура резко снижается, а сезонное промерзание проникает глубже 3.2 м. Не исключено, что здесь происходит слияние сезонной и многолетней мерзлоты. По температурным показателям приземного слоя воздуха зимой здесь несколько теплее, чем в предыдущей ситуации (табл. 1, группа $III_З$), хотя зимы малоснежные и в том, и в другом случае.

В других степных ландшафтах Южного Забайкалья, находящихся на значительном удалении друг от друга, разброс минимальной температуры почвенной толщи находится в относительно узком диапазоне (группа $IV_З$). Оценка зимнего температурного режима проведена в степных котловинах Селенгинского среднегорья (Иволгинск, Хоринск), в Ингодино-Улетовском остепненном долинно-котловинном природном образовании (Улеты). В рассматриваемую группу вошли и степные просторы центральноазиатского типа Улдза-Торейской высокой равнины, представителем которых является Онон-Аргунская степь (Борзя) – естественное продолжение степей Монголии и Китая. К рассматриваемой группе относятся Агинские сухие степи центральноазиатского типа (Агинское),

а также Аргуно-Урулюнгуйские степные ландшафты (Забайкальск). В данной группе степных ландшафтов многолетняя среднегодовая минимальная температура на глубине 0.2 м варьирует от -11.5°С (Борзя) до -18.3°С (Забайкальск), а на 0.8 м – от -7.5°С до -11.6°С. В этом случае сезонное промерзание достигает 2.8-3.2 м, в отдельных случаях – несколько глубже. Его продолжительность на глубине 0.8 м составляет 5-6 месяцев. Этой группе термического режима почвенной толщи соответствует широкое разнообразие показателей климата (табл. 1, группа IV_3). Как следует из рисунка 2, в степях Южного Забайкалья зимой весь почвенный профиль охлаждается сильнее и имеет более широкий диапазон локальных проявлений, чем в Предбайкалье и Прибайкалье.

Многолетняя среднегодовая максимальная температура почвенной толщи в степных ландшафтах Предбайкалья и Прибайкалья варьирует от 18.5 до 14.5°С на глубине 0.2 м и от 7.0 до 3.8°С на глубине 3.2 м (рис. 2а). Самые низкие значения максимальной температуры почвенной толщи наблюдаются в Баяндае и Бохане (группа $I_П$). Здесь проникновение температуры 10°С ограничивается глубиной 0.6-0.7 м, а прогревание до 15°С отмечено лишь до глубины 0.2 м. Климатические условия в данных местоположениях близки (табл. 1, группа $I_П$). Почвенная толща в группе степных природных образований Хомутово–Балаганск–Тулун–Тайшет–Узур находится в узком диапазоне температур (группа $II_П$). Здесь глубина проникновения температуры 10°С составляет 1.2-1.8 м, 15°С – 0.2-0.7 м. Летние температурные условия приземного слоя воздуха достаточно близки (табл. 1, группа $II_П$). Исключение составляют степи байкальского о. Ольхон (Узур), где из-за охлаждающего влияния водной массы озера летняя температура воздуха значительно ниже, чем в других рассматриваемых местоположениях (июль – 13.0°С, ΣТв > 10°С лишь 920°С, атмосферные осадки – 217 мм).

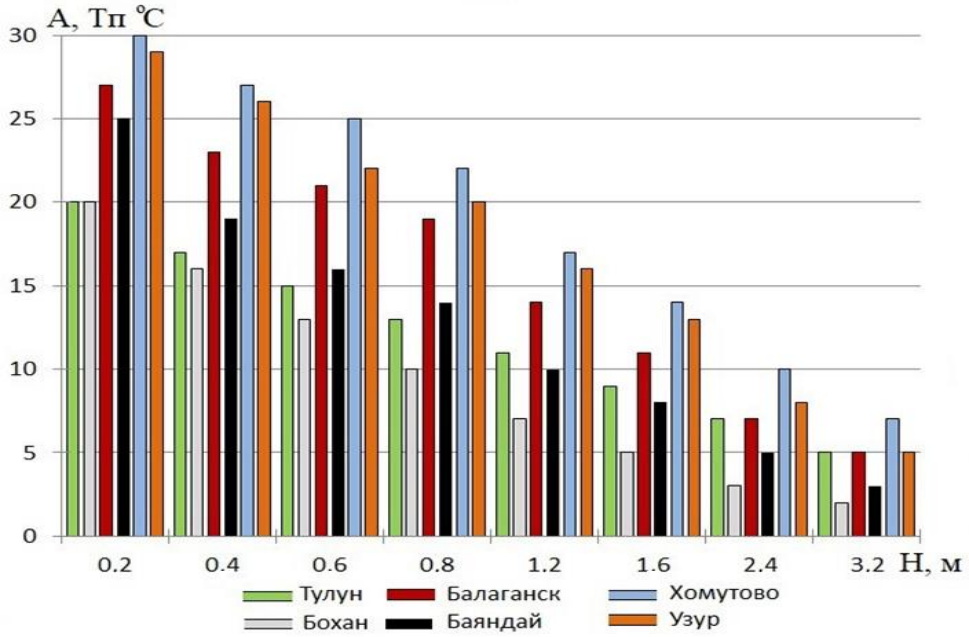
В степных ландшафтах Южного Забайкалья температурные профили многолетней среднегодовой максимальной температуры имеют широкий диапазон (рис. 2б). Своими особенностями отличаются температурные профили почвенной толщи в Еравнинской и Нерчинской котловинах. В первом случае (Сосново-Озерское) летнее прогревание самое слабое (группа I_3). Здесь значение температуры на глубине 0.2 м достигает 12.2°С, а 10°С проникает лишь до 0.4 м. Более того, глубже 2.4 м сохраняется отрицательная температура. Поскольку это район со множеством островов многолетней мерзлоты среди талых грунтов, а зимой сезонная мерзлота проникает глубже 3.2 м, то большая часть летнего тепла расходуется на её оттаивание. Температурные показатели приземного слоя воздуха здесь самые низкие (табл. 1, группа I_3). Во втором случае (Нерчинск), наоборот, верхний слой почвы до 1.2 м прогревается до 10°С, а до 15°С почва прогревается на глубину до 0.7 м. Глубже 1.6 м интенсивность прогревания резко ослабевает и на глубине 2.4 м приближается к 3°С (группа II_3). Показатели температуры воздуха достаточно высокие (табл. 1, группа II_3). Значения температуры в других рассматриваемых почвенных толщах степных ландшафтов находятся в достаточно узком диапазоне. Причем самые высокие значения температуры относятся к почвам как Селенгинского среднегорья (Иволгинск), так и к почвам узкой полосы в долине Амура (Забайкальск). В то же время в отдельных местоположениях Селенгинского среднегорья (Окино-Ключи) и онон-аргунской степи (Борзя) наблюдается более слабое прогревание всей почвенной толщи (группа III_3), которое соотносится с климатическими условиями группы III_3 (табл. 1). Температурные условия почв в местоположениях Хоринск, Улеты, Агинское близки (группа IV_3). В отмеченных пунктах глубина проникновения температуры 10°С в почву составляет 0.8-2.4 м, а температуры 15°С – на глубину 0.3-1.2 м. В этой группе местоположений температурный режим почв определяется температурными условиями группы IV_3 (табл. 1).

Количественные значения и различия в пространстве многолетней среднегодовой амплитуды температуры почвенного профиля хорошо прослеживаются на рисунке 3. Для степных ландшафтов Предбайкалья и Прибайкалья характерно её варьирование от 20°С до 30°С на глубине 0.2 м. Вниз по профилю её значения снижаются и на 2.4 м составляют лишь 3-10°С. Предельные значения относятся к метеостанциям Бохан (низкие значения) и Хомутово (высокие значения), расположенным в относительно сходных степных ландшафтах.

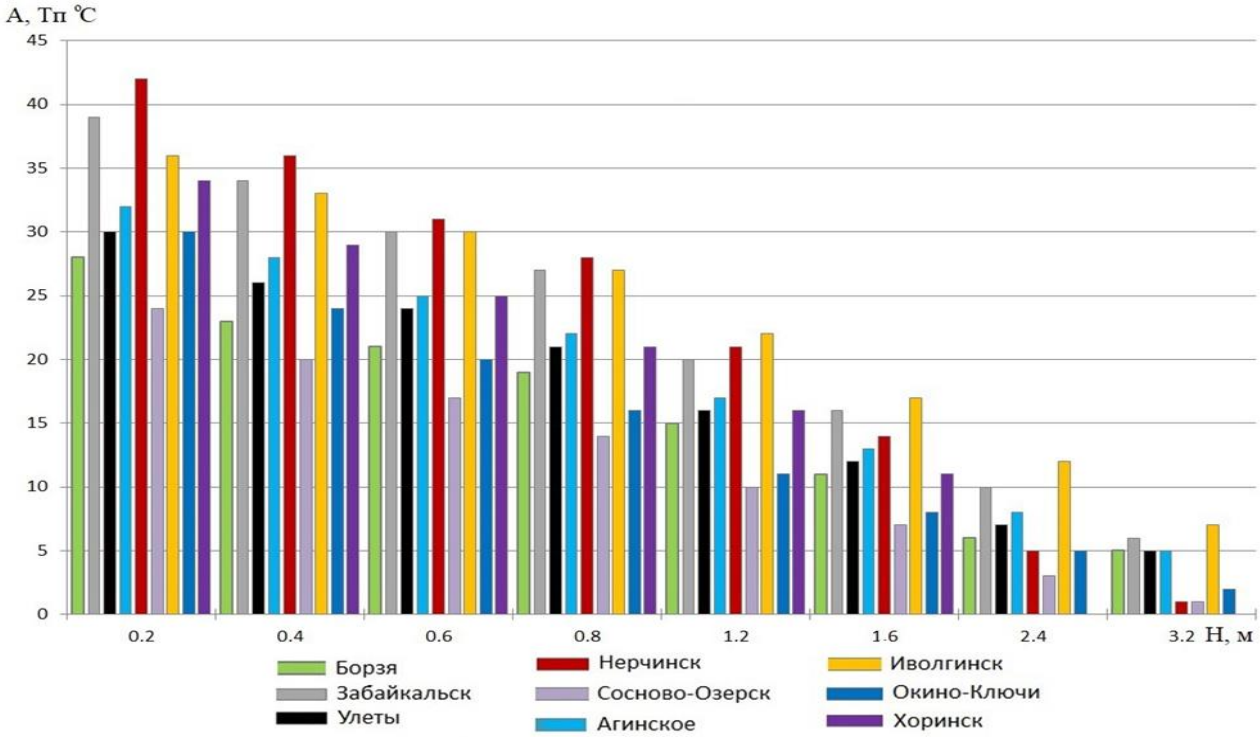
В остальных местоположениях (Тулун, Балаганск, Баяндай, Узур) амплитуды температуры близки и находятся в диапазоне отмеченных предельных значений, хотя пространственно они не только разобщены, но и относятся к разным степным образованиям.

Амплитуды многолетней среднегодовой температуры степных почв Южного Забайкалья

достаточно высокие и имеют широкий диапазон. Самые высокие значения (36-42°С на глубине 0.2 м, 5-12°С на глубине 2.4 м) характерны для ряда степных ландшафтов: долина реки Амур (Забайкальск), узкая Нерченская котловина (Нерчинск), Селенгинская котловина (Иволгинск). Самые низкие амплитуды (24°С на глубине 0.2 м, 3°С на глубине 2.4 м) наблюдаются в луговой степи Еравнинской котловины (Сосново-Озерское) с особым термическим режимом, отмеченным выше. Во всех остальных местоположениях амплитуды находятся в диапазоне предельных значений.



а)



б)

Рис. 3. Амплитуда многолетней среднегодовой температуры почвы (А Тп, °С) на стандартных глубинах измерения (Н, м) в степных ландшафтах юга Восточной Сибири. *Условные обозначения*: а) – Предбайкалье и Прибайкалье, б) – Южное Забайкалье.

Причем близкие значения можно отметить в пространственно разобщенных местоположениях (Окино-Ключи–Борзя, Агинское–Хоринск–Улеты). Значительные амплитуды многолетней среднегодовой температуры в степных ландшафтах Южного Забайкалья свидетельствуют о резко континентальном (и даже экстраконтинентальном) климате почв. Особенно это свойственно метровому слою почвы. Весьма сильное зимнее охлаждение всей почвенной толщи, глубокое и длительное сезонное промерзание при малой толщине снежного покрова и в целом крайне жесткие климатические условия (холодные аридные ландшафты) определяют степное почвообразование. В Южном Забайкалье по этим признакам выделены степные криоаридные почвы (Волковинцер, 1978).

Климатические изменения в системе приземный слой воздуха – почва в последние десятилетия. Отмечено, что на территории России потепление, которое началось во второй половине XX в., оказалось сильнее глобального. Свои особенности в характере изменений наблюдаются в каждом крупном физико-географическом регионе. На территории Восточной Сибири проведена оценка многолетних изменений широкого спектра показателей климата. Определялись тенденции их изменений в разные периоды годового цикла, а также на отдельных временных этапах многолетнего хода. Практически всегда отмечается тенденция к потеплению климата (Трофимова, Балыбина, 2012; Обязов, 2012; Болданов, Мухин, 2016, 2019; Балыбина, Трофимова, 2019; Вахнина, Носкова, 2021; Смахтин, 2021). Эффективными оказались исследования тенденций климатических изменений по 30-летним периодам, используемым в работе Д.Ю. Васильева с соавторами (2023). Авторы установили, что в летний сезон потепление особенно интенсивно происходило в период с 1960 по 1989 гг. В последнее 30-летие темп потепления несколько снизился, но увеличилось число дней с экстремально высокой температурой воздуха.

В нашем исследовании рассматриваются многолетние изменения средней годовой температуры воздуха ($T_в$) и почвы на глубине 40 см ($T_{п40}$), суммарных годовых атмосферных осадков ($P_{год}$) в степных ландшафтах юга Восточной Сибири. Для этого используются временные ряды за период 1985-2020 гг. семи метеостанций, данные по которым по всем требующимся показателям доступны на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации: Баяндай, Балаганск, Тулун, Тайшет (Предбайкалье), Агинское, Борзя, Сосново-Озерское (Южное Забайкалье).

Следует отметить, что межгодовые флуктуации температуры воздуха на метеостанциях, включенных к рассмотрению, происходят с высокой степенью согласованности. Коэффициент корреляции между осредненными температурными рядами четырех метеостанций в Предбайкалье и трех в Южном Забайкалье составляет 0.94. Это свидетельствует о синхронности термического режима воздуха на всей рассматриваемой территории (рис. 4-I). Подобные же результаты о синхронности термического режима воздуха получены Г.И. Черноусенко и Н.Б. Хитровым (2019), что вполне логично, т.к. атмосферные процессы охватывают обширные пространства.

Для осредненных многолетних рядов температуры почвы на глубине 40 см в Предбайкалье и Южном Забайкалье характерна более низкая согласованность (рис. 4- II). Незначимый коэффициент корреляции между ними составляет всего лишь 0.2, что существенно ниже, чем его величина между рядами температуры воздуха. Более того, всплески повышения и понижения температуры почвы и воздуха не всегда совпадают. Обусловлено это тем, что температура почвы дополнительно зависит от внутренних (теплофизические и другие свойства почвы) факторов влияния. Многолетние изменения атмосферных осадков в пространстве не столь согласованы, как температуры воздуха. Межгодовая флуктуация осадков в многолетних рядах на рассматриваемых метеостанциях не совпадает. Коэффициенты корреляции между рядами в Предбайкалье составляет 0.3-0.7, в Южном Забайкалье – 0.4-0.6. Между осредненными многолетними рядами осадков в Предбайкалье и Южном Забайкалье коэффициент корреляции незначим и весьма мал (0.18), что свидетельствует о существенном различии режимов выпадающих осадков на рассматриваемой территории. К тому же в многолетних рядах не совпадают слабо сформировавшиеся циклы повышения-понижения осадков (рис. 4-III), хотя в Южном Забайкалье многолетним изменениям атмосферных осадков в течение двух тридцатилетий (1950-2010 гг.) присущ циклический характер (Обязов, 2012).

Тенденция к повышению температуры воздуха в рассматриваемый временной период характерна для всех метеостанций. Положительный линейный тренд варьирует от 0.2 до 0.4°С/10 лет. Величина

тренда осредненных многолетних рядов температуры воздуха в Предбайкалье (четыре ряда) составляет 0.27°С/10 лет, в Южном Забайкалье (три ряда) – 0.31°С/10 лет. При этом прослеживается тенденция неуклонного повышения температуры без выраженных периодов повышения и понижения (рис. 4-I). Данный период можно отнести к тридцатилетнему циклу температуры воздуха во внутривековом процессе, который отмечен в Даурском экорегионе (Обязов, 2012). Тенденция к повышению температуры почвы характерна почти для всех метеостанций. Положительный линейный тренд варьирует в пространстве от 0.1 до 0.5°С/10 лет (Агинское – тренд практически отсутствует). Хотя повышение температуры воздуха инициирует рост температуры почвы, но осредненные по метеостанциям величины линейных трендов температуры почвы достаточно малы: в Предбайкалье – 0.07°С/10 лет, в Южном Забайкалье – 0.09°С/10 лет. Как и в случае многолетнего хода температуры воздуха, слабый незначимый рост температуры почвы протекает поступательно без выраженных периодов повышения и понижения (рис. 4-II).

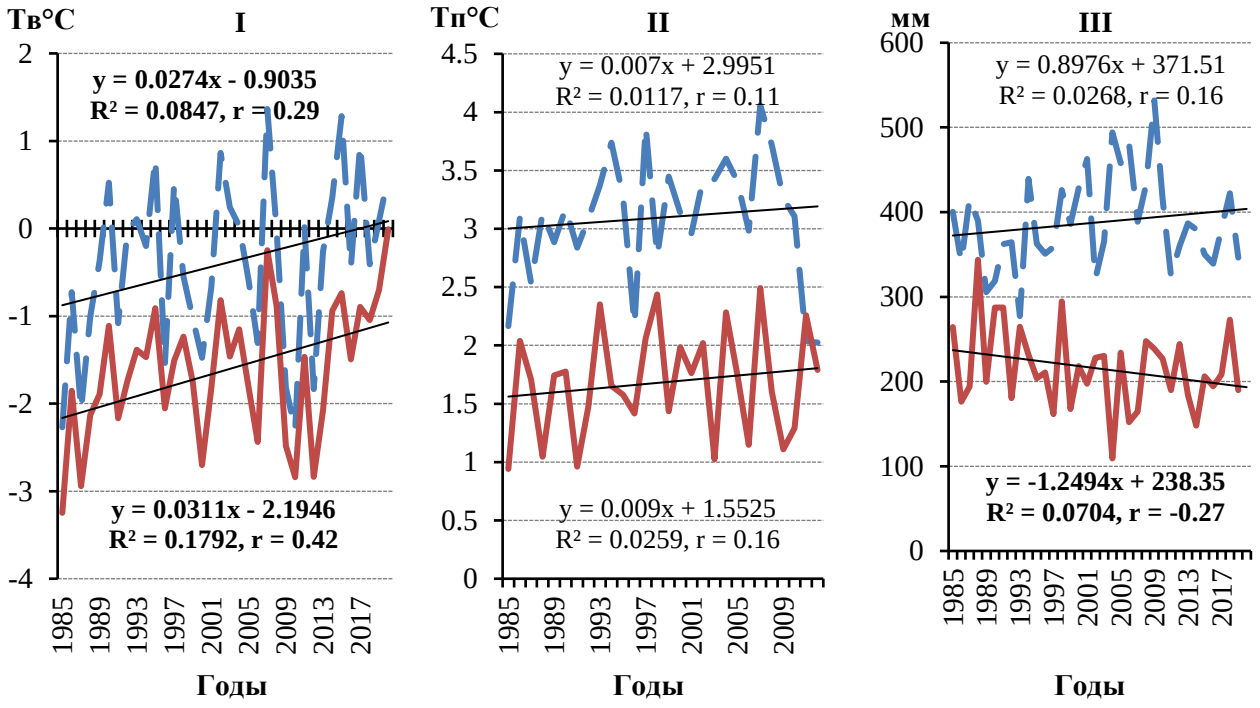


Рис. 4. Динамика осредненных по территории климатических характеристик в Предбайкалье и Южном Забайкалье. *Условные обозначения:* пунктирная линия – Предбайкалье, сплошная линия – Южное Забайкалье, I – средняя годовая температура воздуха, II – средняя годовая температура почвы на глубине 40 см, III – сумма атмосферных осадков за год; жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции и достоверные тренды.

Тенденция изменений годовых сумм атмосферных осадков в Предбайкалье и Южном Забайкалье не совпадает. В первом случае величина линейного тренда положительная и варьирует от 7.5 до 29.3 мм/10 лет (Баяндай – -9.8 мм/10 лет). Средняя величина по территории составляет 8.98 мм/10 лет. Во втором случае тренд везде отрицательный (от -2 до -24.5 мм/10 лет). Осредненная по территории величина составляет -12.5 мм/10 лет. В целом можно отметить, что в Предбайкалье не только больше выпадает осадков за год, чем в Южном Забайкалье, но и тенденция их изменений в рассматриваемый период разная (рис. 4-III). В таблице 2 представлены статистические характеристики линейных трендов, показанных на рисунке 4.

Как можно видеть, линейный тренд температуры воздуха в обоих исследуемых регионах значим, в то время как тренд температуры почвы не достигает 90% уровня значимости. Возможно, это связано с более коротким по сравнению с температурой воздуха рядом данных по температуре почвы. Также значимым является тренд сумм атмосферных осадков в Южном Забайкалье.

Согласно полученным результатам о межгодовых флуктуациях и многолетних колебаниях

гидротермических режимов, можно говорить о прогрессирующей тенденции аридизации климата в Южном Забайкалье по сравнению с Предбайкальем и Прибайкальем. Степные ландшафты, являясь весьма чувствительными к внешним воздействиям, естественно, реагируют на современные климатические изменения в системе «приземный слой воздуха – почва». Отклик компонентов (или их свойств) степных ландшафтов на эти изменения происходит по-разному. Быстрая реакция характерна для биотических компонентов ландшафта. Отклик растительности и почвы на климатические изменения изучались в онон-аргунских степях центральноазиатского типа, являющихся естественным продолжением степей Монголии и Китая. Рост температуры воздуха, уменьшение атмосферных осадков и снижение запасов влаги в почве (1955-2008 гг.) существенно повлияли на жизненное состояние растительного покрова (усыхание древостоев, снижение высоты и густоты травостоев), его видовое разнообразие (появились ксерофильные виды), почвенно-геохимические показатели (Мониторинг …, 2010; Проблемы адаптации …, 2012; Давыдова, 2022). Изменения климата оказывают существенное влияние и на ход других природных процессов. Так, в междуречье Онона и Аргуни отмечается иссушение озер и даже их исчезновение. Днища высохших озер превратились в содово-сульфатные натриевые и содово-хлоридно-сульфатные натриевые солончаки (Проблемы адаптации …, 2012; Давыдова, 2022). На примере лесостепных, степных и опустыненно-степных ландшафтов юга Сибири в количественном выражении показана современная денудация, обусловленная климатическими изменениями (Баженова, 2018).

Таблица 2. Статистические показатели линейных трендов.

Статистические критерии	Предбайкалье			Южное Забайкалье		
	$T_в$	$T_{п40}$	$R_{год}$	$T_в$	$T_{п40}$	$P_{год}$
Δ	0.3	0.07	9.0	0.3	0.09	–12.4
R^2	0.08	0.01	0.03	0.18	0.03	0.07
F	**0.08**	0.58	0.31	**0.01**	0.41	**0.1**

Примечания к таблице 2: Δ – значение тренда показателя ед./10 лет, R^2 – коэффициент регрессии, F – значимость коэффициента регрессии.

Отмеченные определенные изменения регионального климата в последние десятилетия и отклик компонентов ландшафта на эти изменения определили тенденции и закономерности современного развития островных степей юга Восточной Сибири. Климатические изменения совместно с антропогенной нагрузкой на подстилающую поверхность соотносятся с деградацией (= опустыниванию) земель в зоне интенсивного землепользования. Вопросы деградации наиболее разработаны для территории Южного Забайкалья Э.Ц. Дамбиевым и А.К. Тулохоновым (1993). Авторы отметили, что в степных котловинах забайкальского типа (Селенгинское среднегорье) опустынивание связано в большей степени с пахотной формой землепользования, чем с пастбищной деятельностью. В южных степных образованиях формируется «техногенное опустынивание», вызванное воздействием предприятий горнодобывающей промышленности (Тулохонова, Тулохонов, 1998). В Даурской степи активизируются природные процессы рельефообразования (Экзогенное …, 2023), что усугубляет опасность климатического опустынивания территории. При этом важно учитывать происходящую цикличность процессов аридизации и антропогенной деградации засушливых земель (Золотокрылин, 2008). В настоящее время для территории Южного Забайкалья разработано направление адаптации аграрного землепользования к климатическим изменениям (Болданов, Мухин, 2019). Дополнительно природоохранные адаптации осуществляются благодаря организации особо охраняемых природных территорий (экорегион «Даурская степь») (Проблемы адаптации …, 2012) и других степных территорий (Чибилёв, 2017).

Выводы

Проведенные исследования термического режима почвенных толщ в островных степях юга Восточной Сибири выявили ряд особенностей, обусловленные увеличением континентальности климата приземной атмосферы в направлении с северо-запада на юго-восток. Зимняя и летняя

температура степных почв на рассматриваемой территории (Предбайкалье, Прибайкалье, Южное Забайкалье) по количественным значениям существенно различается. Самое сильное зимнее охлаждение всей почвенной толщи характерно для степных ландшафтов Южного Забайкалья. Сезонное промерзание составляет здесь более 3 м. В Предбайкалье и Прибайкалье сезонная мерзлота достигает 1-2.4 м, в единичных случаях – 2.6-3 м. Летнее прогревание степных почв имеет широкий диапазон. Температура 15°С в Южном Забайкалье проникает до глубины от 0.2 до 1.2 м, в Предбайкалье и Прибайкалье – на глубину от 0.2 до 0.8 м. То есть зимнее охлаждение почв усиливается в юго-восточном направлении, а летнее прогревание почв в этом же направлении незначительно увеличивается (за исключением единичных случаев). Как суммарный эффект, годовые амплитуды температуры подчеркивают усиление континентальности климата почвенной толщи степных ландшафтов в юго-восточном направлении.

Из анализа многолетних рядов показателей климата на территории островных степей юга Восточной Сибири следует, что достаточно высокая согласованность характерна для средней годовой температуры приземного слоя воздуха несколько слабее для средней годовой температуры почвы. Согласованность многолетнего хода атмосферных осадков практически отсутствует. Для температуры воздуха и почвы отмечена тенденция к повышению, для атмосферных осадков – к снижению в Южном Забайкалье и незначительному повышению в Предбайкалье. В целом, согласно полученным результатам по межгодовым флуктуациям и многолетним колебаниям гидротермических режимов, можно говорить о прогрессирующей тенденции аридизации климата в Южном Забайкалье по сравнению с Предбайкальем и Прибайкальем.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме НИР АААА-А21-121012190059-5 "Изучение структурно-функциональной организации геосистем регионов Сибири для планирования устойчивого территориального развития" 2021-2025 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Республики Бурятия. 2000 / Ред. А.Б. Иметхенов. М.: ФСГК России. 48 с.

Атлас. 2004. Иркутская область: Экологические условия развития / М., Иркутск: Изд-во Института географии им. акад. В.Б. Сочавы СО РАН. 90 с.

Баженова О.И. 2018. Современная денудация предгорных степных равнин Сибири. Новосибирск: Гео. 259 с.

Балыбина А.С., Трофимова И.Е. 2019. Динамика температуры почвы на территории Забайкалья в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. № 10. С. 109-116.

Балыбина А.С., Трофимова И.Е. 2022. Подходы к картографированию термического режима почв в условиях контрастного рельефа Забайкалья // Геодезия и картография. № 10. С. 20-28.

Болданов Т.А., Мухин Г.Д. 2016. Климатические изменения в Республике Бурятия в конце XX и в начале XXI вв. и экологические риски землепользования // Проблемы региональной экологии. № 6. С. 94-100.

Болданов Т.А., Мухин Г.Д. 2019. Экологическая адаптация сельскохозяйственного землепользования в условиях изменения климата в Республике Бурятия // Аридные экосистемы. Т. 25. № 1 (78). С. 10-19. [*Boldanov T.A., Mukhin G.D.* 2019. Ecological Adaptation of Agricultural Land Use under Climate Change in the Republic of Buryatia // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 1. P. 7-14.]

Будыко М.И. 1971. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеорологическое издательство. 472 с.

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. 2021. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942 [Электронный ресурс http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных (дата обращения 20.04.2023)].

Васильев Д.Ю., Семёнов В.А., Чибилёв А.А. 2023. Климатические изменения температурного режима на территории России в XX – начале XXI века // География и природные ресурсы. № 2. С. 19-23.

Вахнина И.Л., Носкова Е.В. 2021. Изменения климатических условий Юго-Восточного Забайкалья за период вегетации по метеорологическим и дендрохронологическим данным // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. № 3 (381). С. 80-98.

Волковинцер В.И. 1978. Степные криоаридные почвы. Новосибирск: Наука. 208 с.

Давыдова Н.Д. 2022. Изменения в компонентах степных геосистем юго-восточного Забайкалья в условиях потепления климата // Аридные экосистемы. Т. 28. № 1 (90). С. 3-10. [*Davydova N.D.* 2022. Change in the Components of Steppe Geosystems in the Southwestern Transbaikal Region with Climate Warming // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 1. P. 1-7.]

Дамбиев Э.Ц., Тулохонов А.К. 1993. Антропогенное опустынивание в Бурятии // География и природные ресурсы. № 3. С. 60-64.

Золотокрылин А.Н. 2008. Климат и опустынивание засушливых земель России // Извести РАН. Серия географическая. № 2. С. 27-35.

Ландшафты юга Восточной Сибири. 1977. Карта. Масштаб 1: 1500000 / Ред. В.Б. Сочава. М.: ГУГК. 4 л.

Метеорологический ежемесячник. 1978-1989. Новосибирск. Вып. 22. Ч. 2. Чита. Вып. 23. Ч. 2.

Михеев В.С. 2001. Ландшафтный синтез географических знаний. Новосибирск: Наука. 216 с.

Мониторинг и прогнозирование вещественно-динамического состояния геосистем сибирских регионов. 2010 / Ред. Е.Г. Нечаева, И.А. Белозерцева, Е.В. Напрасникова. Новосибирск: Наука. 315 с.

Обязов В.А. 2012. Изменение климата и гидрологического режима рек и озер в Даурском экорегионе // Проблемы адаптации к изменению климата в бассейнах рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. Сборник научных трудов биосферного заповедника «Даурский». Чита: Экспресс-издательство. Вып. 5. С. 24-45.

Проблемы адаптации к изменению климата в бассейнах рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. 2012. Сборник научных трудов биосферного заповедника «Даурский». Чита: Экспресс-издательство. Вып. 5. 179 с.

Растительность. 1972. Карта. Масштаб 1: 1500000 / Ред. В.Б. Сочава. М.: ГУГК. 4 л.

Смахтин В.К. 2021. Оценка изменения климата на территории Забайкальского края по состоянию на 2021 год [Электронный ресурс https://zabgidromet.ru/oczenka-izmeneniya-klimata-na-territorii-zabajkalskogo-kraya-po-sostoyaniyu-na-2021-god/ (дата обращения 01.04.2023)].

Трофимова И.Е., Балыбина А.С. 2012. Мониторинг температуры почвы и толщины снежного покрова на территории Иркутской области // Лёд и снег. № 1. С. 62-68.

Трофимова И.Е., Балыбина А.С. 2016. Классификация и географические закономерности термического режима почв Иркутской области // География и природные ресурсы. № 4. С. 81-90.

Трофимова И.Е., Осипова О.П., Балыбина А.С. 2019. Подходы к оценке климатоэкологических ресурсов территории Сибири // Сибирский экологический журнал. № 5. С. 538-549.

Тулохонова Н. Н., Тулохонов Ю.М. 1998. Земельные ресурсы и экологические проблемы юга Читинской области // География и природные ресурсы. № 1. С. 121-126.

Черноусенко Г.И., Хитров Н.Б. 2019. Изменение климата в зоне распространения засоленных почв криоаридных регионов на юге Восточной Сибири // Экосистемы: экология и динамика. Т. 3. № 3. С. 5-57.

Чибилёв А.А. 2017. Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия. М., Оренбург: Институт степи РАН; РГО. 420 с.

Экзогенное рельефообразование в степях Даурии. 2023 / Ред. О.И. Баженова, Е.М. Тюменцева, А.А. Черкашина, С.А. Тухта. Новосибирск: СО РАН. 183 с.

Экологический атлас бассейна озера Байкал. 2015. Иркутск: Изд-во Института географии им. акад. В.Б. Сочавы СО РАН. 145 с.