

УДК 551.583

**ИЗМЕНЕНИЕ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
В 1980-2050 ГОДЫ ПО ДАННЫМ СЦЕНАРНЫХ ПРОГНОЗОВ
НА ОСНОВЕ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ СМIP6**

© 2024 г. Е.Ю. Мордвин, Н.М. Почемин, Н.В. Волков, А.А. Бондарович, А.А. Лагутин

*Алтайский государственный университет
Россия, 656049, г. Барнаул, просп. Ленина, д. 61
E-mail: zion0210@gmail.com, a9130262571@gmail.com*

Поступила в редакцию 20.03.2024. После доработки 09.04.2024. Принята к публикации 10.04.2024.

Проведены исследования изменений влагообеспеченности территории в подзоне сухой степи юга Западной Сибири (географические координаты: 50.5°-54.5° с.ш., 77.5°-83.0° в.д.) для периода 1980-2050 гг. В качестве основного показателя уровня влагообеспеченности региона используется гидротермический коэффициент увлажнения Г.Т. Селянинова. Информационной основой исследований являются результаты шести климатических моделей семейства СМIP6, полученные для современного периода 1980-2015 гг., а также в рамках сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 возможной эволюции глобальной климатической системы для 2015-2050 гг. Установлена многолетняя динамика, границы вариаций и тренды гидротермического коэффициента для юга Западной Сибири. Проведен анализ влияния суммарного количества осадков и приземной температуры воздуха на характер и скорость изменения уровня влагообеспеченности региона. Установлено пространственное распределение влагообеспеченности региона и скорость его изменения для исследуемого периода.

Ключевые слова: Западная Сибирь, подзона сухой степи, гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова, влагообеспеченность региона, климатические модели СМIP6, агроклимат.

DOI: 10.24412/1993-3916-2024-3-4-15

EDN: FIIEPV

Ускоренный характер глобальных климатических изменений, наблюдаемый с конца 70-х годов XX века, стимулировал разработку климатических моделей для описания возможной эволюции глобальной климатической системы. В 1995 году по инициативе Рабочей группы по объединенным моделям (англ. «Working Group on Coupled Modelling», WGCM) был создан Проект сравнения объединенных моделей (англ. «Coupled Model Intercomparison Project», СМIP). По замыслу WGCM, участники этого проекта разрабатывают и реализуют совместную стратегию проведения исследований для понимания прошлых, настоящих и будущих изменений климата с использованием глобальных климатических моделей. В настоящее время реализуется шестая фаза проекта (The IPCC ..., 2021). Отметим, что сегодня СМIP6 и связанная с ним инфраструктура данных являются основными источниками информации для Межправительственной группы экспертов по изменению климата (англ. «Intergovernmental Panel on Climate Change», IPCC) и других международных и национальных центров. Помимо описания исторических и современных изменений климата модели СМIP6 дают климатические проекции в рамках возможных сценариев, учитывающих широкий спектр изменений в землепользовании и выбросах парниковых газов, обусловленных вариациями социально-экономических траекторий развития общества (англ. «Shared Socioeconomic Pathways», SSP; O'Neill et al., 2016; Eyring et al., 2016; Семенов, Гладильщикова, 2022).

В исследованиях поведения глобальной климатической системы отдельное место занимает проблема установления поведения ключевых климатических показателей в отдельных регионах. Особое внимание уделяется территориям интенсивного землепользования (FAO, 2021). Согласно Долгосрочной стратегии развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 г. (Распоряжение Правительства РФ от 10.08.2019 г. № 1796-р), Южная Сибирь выделена как регион с благоприятными агроклиматическими условиями для ведения сельского хозяйства. Отметим,

что предварительные результаты исследования климатической системы Западной Сибири для периода 1970-2050 гг. получены в наших работах (Лагутин и др., 2012, 2013, 2018; Lagutin et al., 2016, 2017) с использованием региональной климатической модели RegCM4 (Giorgi et al., 2012).

Очевидно, что в условиях меняющегося глобального климата неизбежно возникают агроклиматические риски, обусловленные повышением среднегодовых температур и снижением запасов влаги в почве в ранние сроки вегетации, расширением ареалов вредителей, продолжительностью осадков в поздние сроки вегетации, дефицитом водных ресурсов для орошения. Меры, способствующие сохранению продовольственного потенциала, в первую очередь должны быть основаны на результатах комплексных научных исследований, учитывающих не только приведенные выше факторы, но и возможные смещения границ агроклиматических зон на фоне глобального потепления (Khan и др., 2023).

В качестве одного из основных агроклиматических показателей признания территории в качестве благоприятной для ведения сельского хозяйства в Стратегии принят гидротермический коэффициент увлажнения Г.Т. Селянинова (англ. «Hydro-thermal Coefficient of Selyaninov», НТС; далее – ГТК Селянинова), характеризующий уровень влагообеспеченности региона. Согласно определению, регионы с ГТК < 0.6 относятся к территориям сухого земледелия, требующим проведения мероприятий по ирригации. Отметим, что подход к исследованиям уровня влагообеспеченности регионов с использованием ГТК Селянинова распространен в России и странах СНГ (WMO, GWP, 2016; Лемешко и др., 2021). В зарубежных исследованиях (Gebrechorkos et al., 2022; Essa et al., 2023) принято использовать индекс SPEI (англ. «Standardized Precipitation Evapotranspiration Index»).

Целью работы является исследование изменений влагообеспеченности территории в подзоне сухой степи юга Западной Сибири для периода 1980-2050 гг. с использованием результатов шести климатических моделей семейства CMIP6, полученных для современного периода 1980-2015 гг., а также в рамках сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 возможной эволюции глобальной климатической системы для 2015-2050 гг.

Материалы и методы

Исследуемая область. Зона сухой степи юга Западной Сибири (географические координаты: 50.5°-54.5° с.ш., 77.5°-83.0° в.д.) включает южную часть Барабинской низменности и всю Кулундинскую равнину. На ее территории расположены западная часть Алтайского края, юг Новосибирской области и часть северо-восточного Казахстана (рис. 1). Согласно классификации климатов Кёппена-Гейгера (Beck et al., 2018; Веше и др., 2021), восточная часть исследуемой области относится к категории Dfb или умеренный континентальный климат, а западная часть – к типу BSk или холодный степной климат. Для климата данной территории характерны продолжительная холодная малоснежная зима и короткое, но жаркое лето. Безморозный период длится 112-120 дней в году с 15-25 мая по 10-15 сентября. Годовое количество осадков – около 250-450 мм, а в апреле-октябре – около 200 мм. В северной части расположены луговые степи на хорошо развитых черноземных почвах. При продвижении на юг и юго-запад появляются типичные степи с более засухоустойчивыми дерновинными злаками. При движении к границе Республики Казахстан получают распространение сухие степи – разнотравно-дерновинно-злаковые степи на каштаноземах (Веше и др., 2021). За более чем 200-летнюю историю развития сельского хозяйства на месте прежних природных экосистем сформировались экосистемы нового типа – агроэкосистемы. Агрофитоценозы данной территории по большей части монокультурны. На территории выращивается небольшое количество высокопродуктивных видов и сортов, прежде всего зерновых культур, которые занимают обширные однотипные сельскохозяйственные площади. К наиболее распространенным выращиваемым культурам относятся пшеница, подсолнечник, кукуруза, кормовые травы, в лесостепных районах – гречиха, рожь, сахарная свекла, лен, рапс, соя (Силантьева и др., 2021).

На рисунке 1 показана классификация типов подстилающей поверхности по данным за 2019 год продукта MCD12Q1 (Friedl, Sulla-Menashe, 2019) радиометра MODIS спутников Terra и Aqua, полученного для территории юга Западной Сибири (Сервис ..., 2023).

Материалы и методы. Для получения количественных оценок влагообеспеченности территорий используются комплексные показатели – гидротермические коэффициенты, в основе которых лежат математические соотношения между климатическими характеристиками, такими как: температура

воздуха, интенсивность осадков, эвапотранспирация и др. В России и странах СНГ для оценок уровня влагообеспеченности территории принято использовать ГТК Селянинова (WMO, GWP, 2016). Коэффициент Селянинова чувствителен к засушливым условиям. Вместе с тем он обладает гибкостью и может применяться на различных временных масштабах от многолетнего до месячного и декадного (Селянинов, 1928). Согласно Л.С. Кельчевской (1971), ГТК Селянинова определяется по формуле:

$$ГТК = \frac{10 \sum_n^{T>T_k} R}{\sum_n^{T>T_k} T} \quad (1),$$

где R – суммарное суточное количество осадков (мм), T – среднесуточная температура приземного слоя воздуха ($^{\circ}C$), T_k – пороговое значение температуры, определяющее количество слагаемых в числителе и знаменателе (зависит от с/х культуры, общепринятым значением является $T_k = +10^{\circ}C$), n – количество дней с температурами выше T_k .

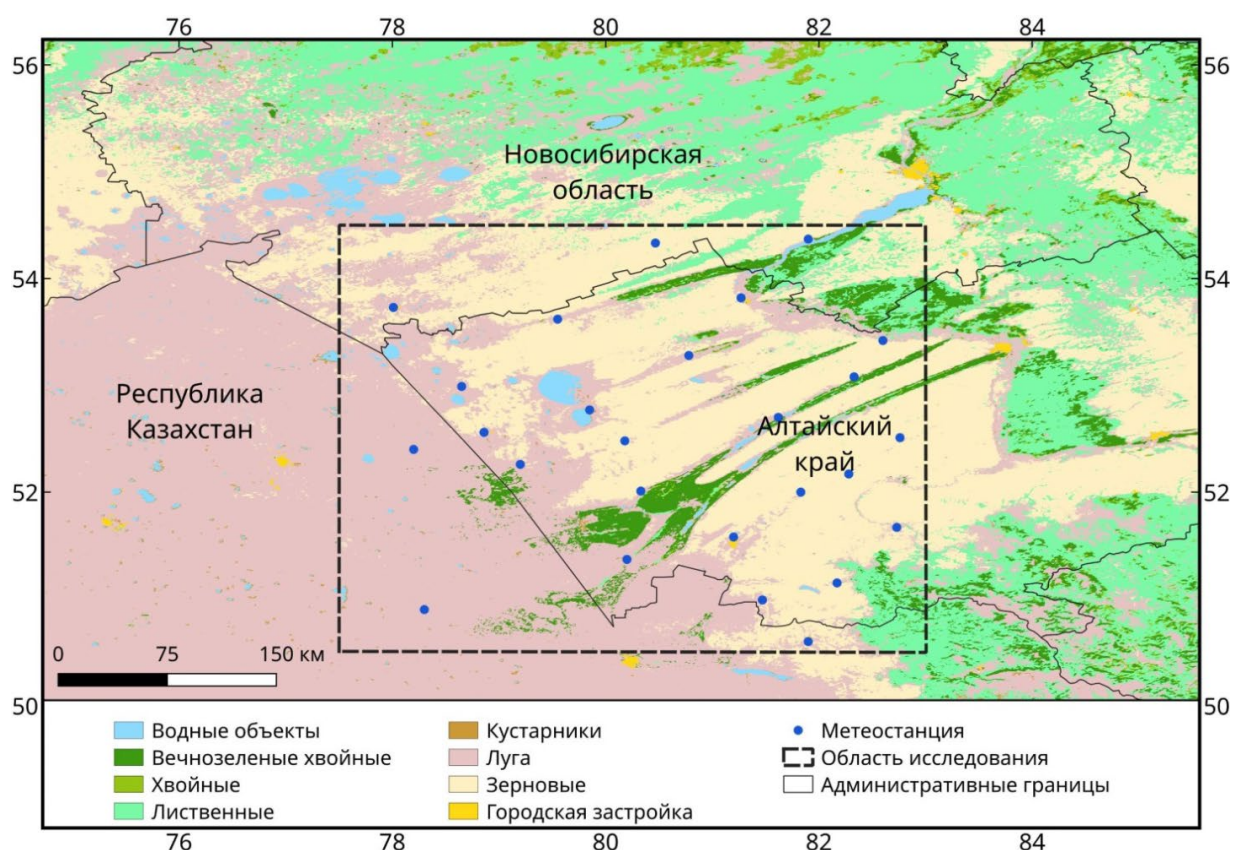


Рис. 1. Классификация типов подстилающей поверхности по данным продукта MCD12Q1 за 2019 год для территории юга Западной Сибири. Условные обозначения: пунктирный прямоугольник – область исследования (географические координаты: 50.5°-54.5° с.ш., 77.5°-83.0° в.д.), темные точки – метеостанции.

Требуемые для расчетов ГТК по формуле (1) суточные значения температуры и интенсивности осадков были получены из продуктов моделирования глобальных климатических моделей проекта CMIP6. Данные для всех моделей и сценариев доступны для скачивания на официальном портале проекта (Официальный ..., 2023). Копия архива этих данных размещена на портале Службы мониторинга атмосферы Copernicus Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF; Портал ..., 2023).

Шестая фаза проекта CMIP включает данные 37 моделей, описывающих проекции развития глобальной климатической системы в рамках 5 сценариев. В отличие от моделей предыдущих фаз проекта CMIP, модели шестой фазы учитывают различные вариации социально-экономических

траекторий развития общества и различный характер этих влияний на землепользование и выбросы парниковых газов.

Следует отметить, что для территории России имеется ограниченное количество исследований по верификации моделей проекта CMIP6 (Володин, 2022; Володин, Грицун, 2020; Володин и др., 2017). Отдельно можно выделить работы, посвященные анализу данных CMIP6 при прогнозировании агроклиматических характеристик (Лемешко и др., 2021, Khan et al., 2023). В частности, в работе Н.А. Лемешко с соавторами (2021) приведен рейтинг моделей по качеству описания климатических данных, полученных в инструментальных наблюдениях для европейской части территории России. Принимая во внимание результаты Н.А. Лемешко, для анализа ГТК Селянинова были выбраны данные шести моделей проекта CMIP6 для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5, которые наилучшим образом описывают современное состояние климата европейской части территории России. Названия моделей и краткие сведения о них приведены в таблице 1.

Таблица 1. Модели проекта CMIP6, используемые в работе.

Название модели	Центр разработки, страна	Год создания	Пространственное разрешение
INM-CM5-0	INM, Россия	2016	2.0° x 1.5°
CESM2	NCAR, США	2018	1.25° x 0.94°
EC-Earth3-CC	EC-Earth-Consortium, EC	2019	0.7° x 0.7°
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL, США	2018	1.25° x 1.00°
CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS, Франция	2017	1.4° x 1.4°
NorESM2-MH	NCC, Норвегия	2017	1.25° x 0.94°

В завершении параграфа приведем краткое описание характера климатических изменений, прогнозируемых в рамках сценариев SSP2 и SSP5.

SSP2 (англ. «Steady Policies») представляет собой группу сценариев, в рамках которых предполагается умеренное изменение климата. Считается, что в будущем будут приниматься меры для сокращения выбросов парниковых газов, а увеличение влияния социально-экономических факторов останется на уровне 2015 года. Выбросы CO₂ к 2100 году в рамках сценариев SSP2 достигнут постоянного уровня, превышающего уровень 2015 года на ~200 млн⁻¹. Согласно сценарию SSP2-4.5, радиационный форсинг стабилизируется к 2100 году на уровне 4.5 Вт/м², что приведет к увеличению глобальной температуры на 2.4°C (O'Neill et al., 2016).

SSP5 (англ. «Fossil-Fueled Development») – группа сценариев, учитывающих высокий уровень экономического роста, при котором будет использоваться больше ископаемого топлива. Согласно этой группе сценариев, в период 2015-2100 гг. следует ожидать ускоренное увеличение выбросов парниковых газов. В рамках сценария SSP5-8.5 прогнозируется стремительный рост концентрации CO₂ в атмосфере, превышающий уровень 2015 года на ~750 млн⁻¹. Уровень радиационного форсинга к 2100 году составит ~8.5 Вт/м², что приведет к повышению температуры приземного слоя воздуха на ~4.4°C по сравнению с 2015 г. (O'Neill et al., 2016).

Результаты и обсуждение

Верификация моделей. На первом этапе исследований проведено сопоставление результатов моделей проекта CMIP6 для современного периода 1980-2015 гг. с данными наземных наблюдений, полученными на метеостанциях (Специализированные ..., 2022). Суточные значения приземной температуры воздуха и интенсивности осадков по данным шести моделей CMIP6 были интерполированы в точках расположения 26 метеостанций. Пространственное расположение метеостанций в области исследования показано на рисунке 1. По полученным данным с использованием формулы (1) вычислены годовые значения ГТК Селянинова для периода 1980-2015 гг. Далее проведен корреляционный анализ модельных значений ГТК и ГТК по данным метеостанций. В таблице 2 приведены статистические метрики проведенного анализа: коэффициент линейной корреляции по Пирсону (англ. «Pearson correlation coefficient», PCC), средняя абсолютная ошибка (англ. «mean absolute error», MAE), среднеквадратичная ошибка (англ. «mean squared error», MSE) и коэффициента детерминации R².

Таблица 2. Статистические метрики PCC, MAE, MSE, R², полученные в результате сопоставления модельных значений ГТК и ГТК по данным метеостанций.

Модель	Коэффициент корреляции (PCC)	Средняя абсолютная ошибка (MAE)	Среднеквадратичная ошибка (MSE)	Коэффициент детерминации (R ²)
INM-CM5-0	-0.005	0.42	0.31	-2.73
CESM2	0.115	0.35	0.23	-1.84
EC-Earth3-CC	0.154	0.50	0.38	-3.91
GFDL-ESM4	-0.085	0.52	0.41	-4.27
CNRM-CM6-1	-0.104	0.52	0.41	-4.02
NorESM2-MM	-0.046	0.45	0.34	-2.81

Видно, что для территории юга Западной Сибири для современного периода 1980-2015 гг. результаты модели CESM2 лучше согласуются с данными наземных метеостанций.

В результате индивидуального корреляционного анализа для каждой из 26 метеостанций установлено, что для пунктов Щербакты, Змеиногорск, Шемонаиха (ID 36012, 36038, 36186) инструментальные значения ГТК Селянинова завышены по сравнению с результатами модели CESM2, в то же время для станций Карасук и Семиярка (ID 29814, 36152) значения ГТК систематически занижены. Лучшее согласие данных модели и наблюдений установлено для метеостанций Камень-на-Оби, Шелаболиха, Славгород, Благовещенка, Родино, Ключи, Кулунда, Угловское (ID 29822, 29915, 29916, 36020, 36021, 36024, 36028).

Прогностические оценки ГТК. На втором этапе исследований по данным 6-ти моделей проекта CMIP6 в рамках двух групп сценариев SSP2 и SSP5 получены оценки ГТК Селянинова для периода 2015-2050 гг.

На рисунке 2 показан многолетний ход и межгодовая изменчивость усредненных по области исследования годовых значений показателя ГТК, которые ранее были получены для каждого пространственного узла всех используемых климатических моделей. Результаты для современного периода 1980-2015 гг. также отображены на рисунке 2. Линиями показана скорость изменения ГТК Селянинова (Δ ГТК) для периода 1980-2050 гг. Видно, что в исследуемый период данные моделей CESM2 и INM-CM5-0 демонстрируют уменьшение средних значений ГТК со скоростью $\sim 0.03/(10 \text{ лет})$. Для моделей GFDL-ESM4, CNRM-CM6-1 и NorESM2-MM тренд нейтральный. Слабый положительный тренд Δ ГТК, равный $\sim 0.01/(10 \text{ лет})$ установлен только по результатам модели EC-Earth3 в рамках сценария SSP5-8.5.

Для установления влияния приземной температуры воздуха и интенсивности осадков на значения ГТК Селянинова в регионе были проведены исследования вариаций этих климатических переменных для периода 1980-2050 гг. для шести моделей CMIP6. В силу установленной выше слабой зависимости результатов расчетов ГТК от выбранного семейства сценариев, на этом этапе использовались данные только для сценария SSP2-4.5. На рисунке 3 показаны суммарные годовые значения температуры воздуха для дней, в которые средняя суточная температура превышала пороговые значения $+10^{\circ}\text{C}$, а также значения суммарной годовой интенсивности осадков в эти дни (умноженные на 10 согласно определению ГТК). Видно, что для всех моделей кроме EC-Earth3, установлен практически нейтральный тренд изменения суммарной интенсивности осадков. Для модели EC-Earth3 тренд составляет $\sim 9 \text{ мм/год}$. Вместе с тем, все модели указывают на рост приземной температуры воздуха со скоростями в интервале от $+7.7^{\circ}\text{C/год}$ в модели CNRM-CM6-1 до $+14.1^{\circ}\text{C/год}$ в модели CESM2.

Отметим, что показанные на рисунках 2 и 3 результаты для юга Западной Сибири в целом соответствуют результатам и выводам, полученным авторами ранее в исследованиях характеристик климатической системы Западной Сибири, проведенных с использованием региональной климатической модели RegCM4, данных глобальных моделей предыдущей фазы проекта CMIP5, реанализов и данных дистанционного зондирования Земли (Лагутин и др., 2012, 2013, 2018; Lagutin et al., 2016, 2017). Новые результаты также хорошо согласуются с данными климатических изменений, полученными в (Бондарович и др., 2019) по инструментальным наблюдениям за 1960-

2016 гг. В работе (Бондарович и др., 2019) авторами так же установлено слабое влияние скорости изменения осадков на уровень влагообеспеченности степной зоны юга Западной Сибири. Вместе с тем эти результаты противоречат прогностическим оценкам по осадкам, полученным для исследуемой зоны в работе (Харламова, Фрюауф, 2021).

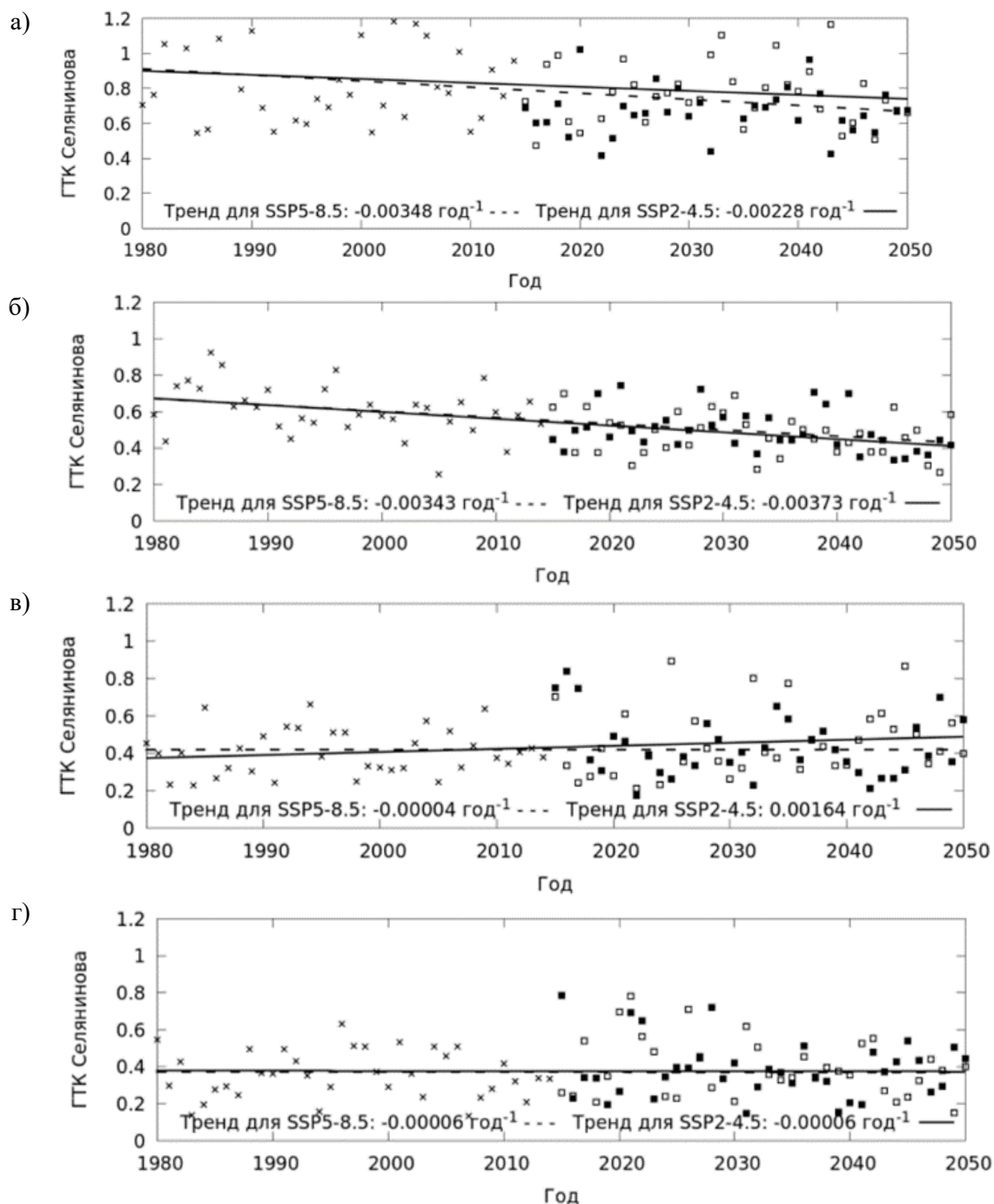


Рис. 2а-г. Многолетний ход и межгодовая изменчивость средних по области исследования значений показателя ГТК для шести моделей CMIP6: а) модель INM-CM5-0, б) модель CESM2, в) модель EC-Earth3-CC, г) модель GDFL-ESM4. Условные обозначения: × – данные для современного периода 1980-2015 гг., □ – данные для сценария SSP2-4.5, ■ – для сценария SSP5-8.5 возможной эволюции глобальной климатической системы, линии на графике – результат аппроксимации данных.

Продолжение рисунка 2.

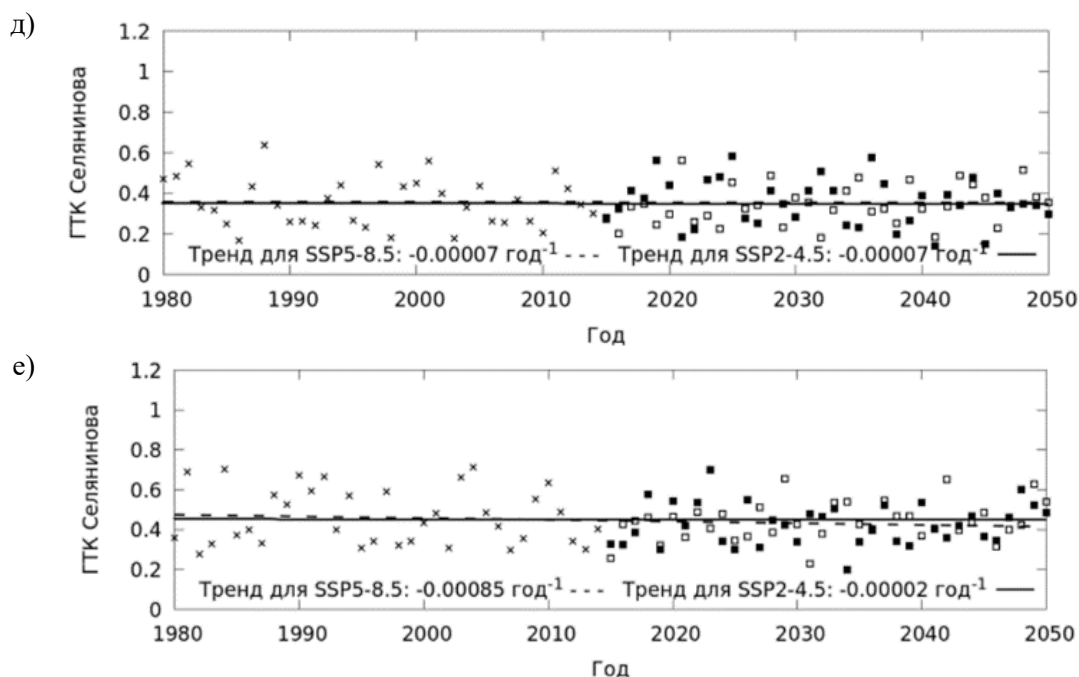


Рис. 2д-е. Многолетний ход и межгодовая изменчивость средних по области исследования значений показателя ГТК для шести моделей CMIP6: д) модель CNRM-CM6-1, е) модель NorESM2-MM. Условные обозначения: × – данные для современного периода 1980-2015 гг., □ – данные для сценария SSP2-4.5, ■ – для сценария SSP5-8.5 возможной эволюции глобальной климатической системы, линии на графике – результат аппроксимации данных.

Сложившаяся система атмосферной циркуляции в исследуемом регионе определяет более засушливые условия на юго-западе Западной Сибири с постепенным возрастанием уровня влагообеспеченности в направлении на северо-восток (Веше и др., 2021). Для проверки качества воспроизведения моделями CMIP6 локальных региональных закономерностей проведено исследование пространственных распределений среднего значения ГТК для каждого пиксела выбранного региона для шести моделей в рамках сценария SSP2-4.5.

На рисунке 4 показаны пространственные распределения средних многолетних значений ГТК, полученных для периода 1980-2050 гг. в рамках сценария SSP2-4.5 для шести исследуемых моделей CMIP6. Несмотря на разное пространственное разрешение моделей (табл. 1), видно, что все они качественно одинаково описывают распределение влагообеспеченности исследуемого региона. Максимально засушливые условия с ГТК = 0.2-0.5 для периода 1980-2050 гг. установлены в юго-западной части Алтайского края и приграничной степной зоне Республики Казахстан для моделей CNRM-CM6-1 и EC-Earth3-CC. Согласно классификации ГТК, в регионах с такими показателями для ведения сельскохозяйственной деятельности требуется реализация специальных мер по проведению ирригационных работ. Для моделей CESM2, GDFL-ESM4 и NorESM2-MM установлены большие значения ГТК = 0.3-0.7, но не смотря на это, согласно классификации ГТК, такие территории относятся к засушливым регионам и регионам сухого земледелия. Для модели INM-CM5-0 установлены самые высокие значения ГТК = 0.7-1.0, соответствующие территориям обеспеченного увлажнения. Однако низкое пространственное разрешение модели, по мнению авторов, требует проверки данного результата.

Для принятия административных решений по адаптации с/х комплекса региона к изменениям климата важно знать не только пространственное распределение увлажненности территории, но и скорость ее изменения. На рисунке 5 показано пространственное распределение скорости изменения $\Delta ГТК$ Селянинова $\times 10^2$ (год⁻¹) для периода 1980-2050 гг. для шести моделей CMIP6 в рамках сценария SSP2-4.5.

Видно, что полученные пространственные распределения соответствуют средним оценкам, показанным на рисунке 2. В моделях GDFL-ESM4, CNRM-CM6-1 и NorESM2-MM установлен практически нейтральный тренд Δ ГТК во всех пикселях исследуемой области равный $\sim 10^{-3}$ /год. Данные моделей INM-CM5-0 и CESM2 указывают на небольшой отрицательный тренд в центральной и северо-восточной части области исследования.

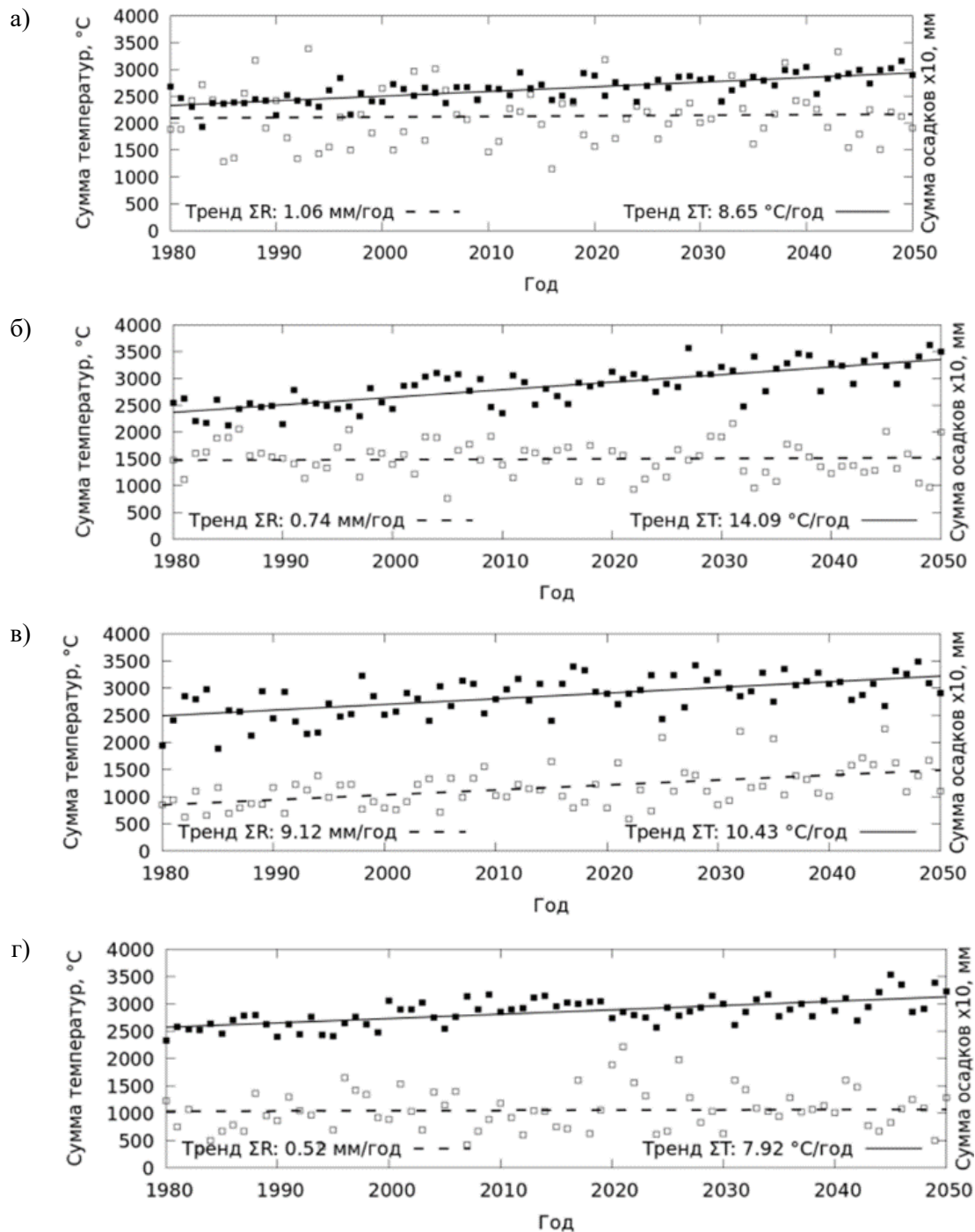


Рис. 3а-г. Суммарные годовые значения температуры воздуха для дней, в которые средняя суточная температура превышала пороговые значения $+10^{\circ}\text{C}$ (■) и суммарная годовая интенсивность осадков в эти дни, умноженная на 10, согласно определению ГТК (□), для шести моделей CMIP6 в рамках сценария SSP2-4.5: а) модель INM-CM5-0, б) модель CESM2, в) модель EC-Earth3-CC, г) модель GDFL-ESM4. Линии на графике – результат аппроксимации данных.

Продолжение рисунка 3.

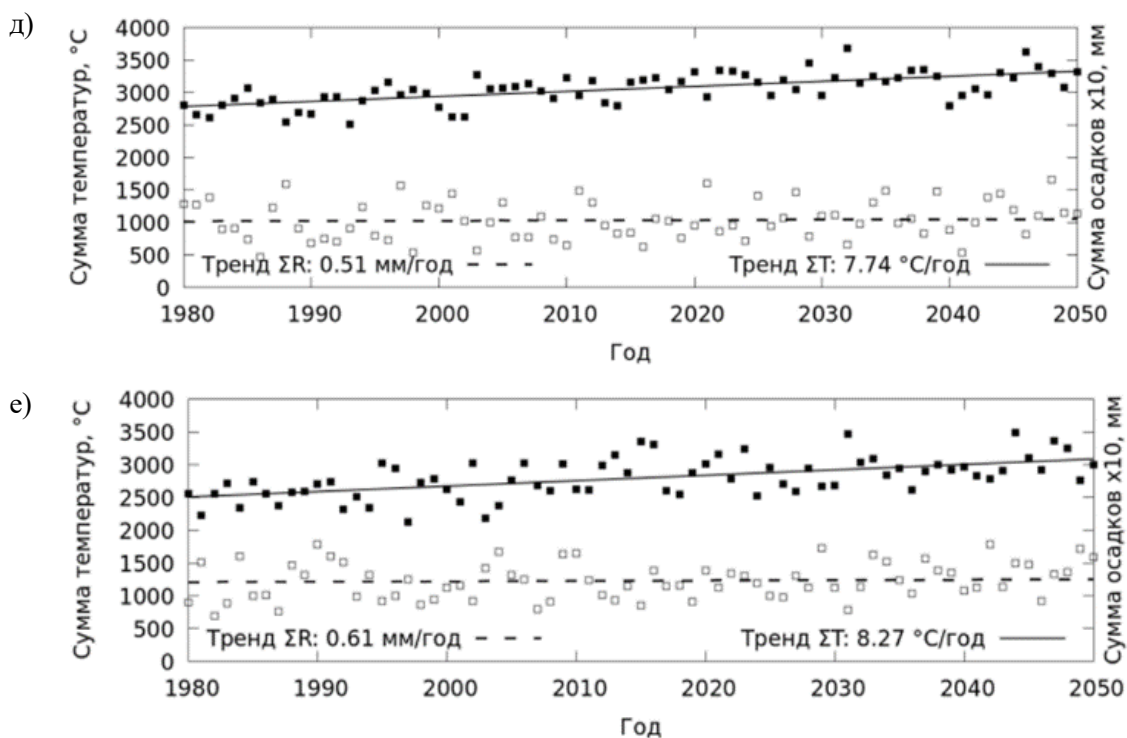


Рис. 3д-е. Суммарные годовые значения температуры воздуха для дней, в которые средняя суточная температура превышала пороговые значения $+10^{\circ}\text{C}$ (■) и суммарная годовая интенсивность осадков в эти дни, умноженная на 10, согласно определению ГТК (□), для шести моделей СМIP6 в рамках сценария SSP2-4.5: д) модель CNRM-CM6-1; е) модель NorESM2-MM. Линии на графике – результат аппроксимации данных.

Результаты модели EC-Earth3-CC указывают на противоположный модели CESM2 положительный тренд в северо-восточной части области исследования. Таким образом, можно сделать вывод, что в первой половине XXI века темпы изменения влагообеспеченности региона изменятся незначительно и останутся на уровне 2015 года.

Выводы

В работе проведены исследования изменений влагообеспеченности почвы в подзоне сухой степи юга Западной Сибири (50.5° - 54.5° с.ш. 77.5° - 83.0° в.д.) для периода 1980-2050 гг. В качестве основного показателя уровня влагообеспеченности региона используется ГТК Селянинова, расчеты которого проведены по данным о приземной температуре воздуха и суммарной суточной интенсивности осадков, полученным из продуктов шести климатических моделей семейства СМIP6. Выполнен анализ ГТК для современного периода 1980-2015 гг., а также в рамках сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 возможной эволюции глобальной климатической системы для 2015-2050 гг.

Показано, что полученные в работе результаты и выводы по многолетней динамике и трендам гидротермического коэффициента для юга Западной Сибири соответствуют результатам, полученным авторами ранее в исследованиях характеристик климатической системы Западной Сибири, проведенных с использованием региональной климатической модели RegCM4, данных глобальных моделей предыдущей фазы проекта СМIP5, реанализов, данных дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений сети гидрометеорологических станций (Лагутин и др., 2012, 2013, 2018; Lagutin et al., 2016, 2017; Бондарович et al., 2019).

Анализ пространственного распределения ГТК Селянинова и скорости его изменения для исследуемого периода показал, что, несмотря на разное пространственное разрешение используемых в работе моделей, все они качественно одинаково описывают распределение влагообеспеченности на

юге Западной Сибири. Полученные количественные оценки указывают, на то, что в первой половине XXI века такие территории следует относить к засушливым регионам и регионам сухого земледелия. Для ведения сельскохозяйственной деятельности на этих территориях в условиях повышенных агроклиматических рисков со стороны органов местной и региональной власти требуется принятие управленческих решений, направленных на выработку и реализацию специальных мер по проведению ирригационных работ.

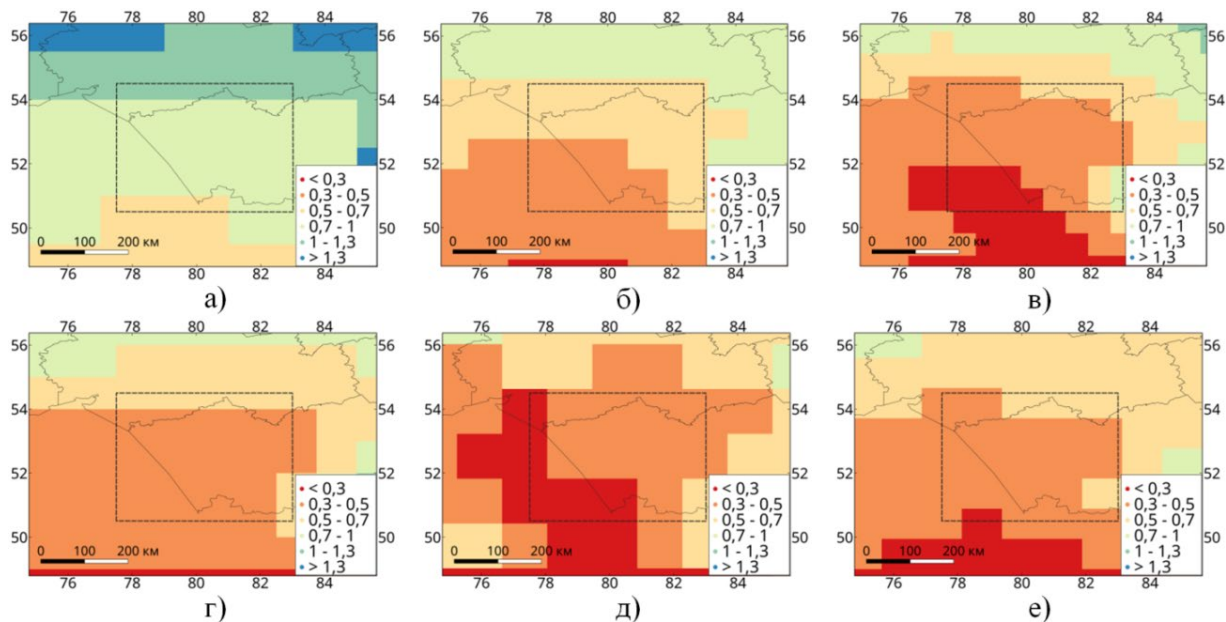


Рис. 4. Пространственные распределения средних многолетних значений ГТК, полученных для периода 1980-2050 гг. для шести моделей CMIP6 в рамках сценария SSP2-4.5: а) модель INM-CM5-0; б) модель CESM2; в) модель EC-Earth3-CC; г) модель GDFL-ESM4; д) модель CNRM-CM6-1; е) модель NorESM2-MM.

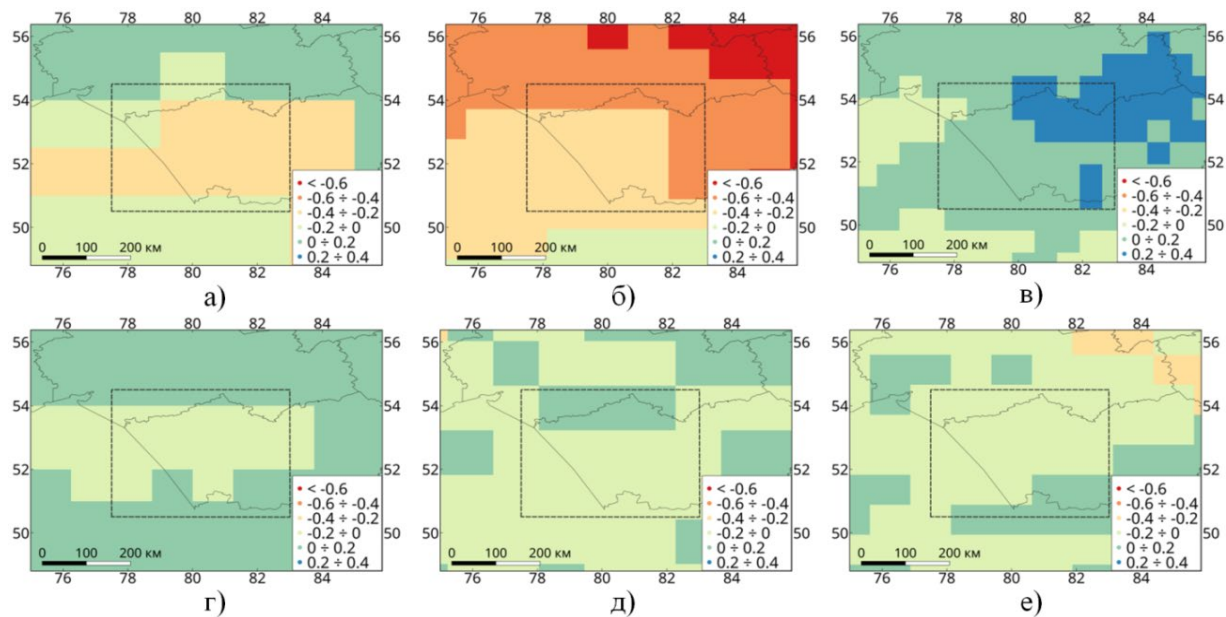


Рис. 5. Пространственное распределение скорости изменения Δ ГТК Сеянинова $\times 10^2$ (год⁻¹) для периода 1980-2050 гг. для шести моделей CMIP6 в рамках сценария SSP2-4.5: а) модель INM-CM5-0; б) модель CESM2; в) модель EC-Earth3-CC; г) модель GDFL-ESM4; д) модель CNRM-CM6-1; е) модель NorESM2-MM.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание на проведение научных исследований, выполняемых в Алтайском государственном университете, проект № FZMW-2023-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондарович А.А., Понькина Е.В., Шмидт Г., Иллигер П., Рудев Н.В., Быков Н.И.* 2019. Анализ хода метеорологических элементов, определяющих условия возделывания теплолюбивых культур в агроклиматических зонах Алтайского края, по данным за 1960-2016 годы // *Агрофизика*. № 1. С. 26-37. [Электронный ресурс <https://www.agrophys.ru/Media/Default/JournalAgrophysica/Agrophysika1-2019/Fulltxt/Bondarovitch.pdf> (дата обращения 12.02.2024)].
- Веше К., Королюк А., Лащинский Н., Силантьева М. М., Роше Х, Хенсен И.* 2021. Глава 2. Кулундинская степь как часть евразийской степной зоны / *Кулунда: сельское хозяйство и низкоэмиссионные технологии устойчивого землепользования: коллективная монография* / Ред. В.И. Беляев, М.М. Силантьева, А.М. Никулин, А.А. Бондарович. Барнаул: Изд-во Алтайского университета. С. 13-46
- Володин Е.М.* 2022. Вероятные изменения климата России в XXI веке по данным модели климата INM-CM5-0 // *Метеорология и гидрология*. № 5. С. 5-13.
- Володин Е.М., Грицун А.С.* 2020. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 56. № 3. С. 255-266.
- Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г.* 2017. Воспроизведение современного климата в новой версии климатической модели ИВМ РАН // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 53. № 2. С. 164-178.
- Кельчевская Л.С.* 1971. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии Л.: Гидрометеидат. 215 с.
- Лагутин А.А., Волков Н.В., Мордвин Е.Ю.* 2018. Влияние глобальных климатических изменений на климат Западной Сибири в первой половине XXI века // *Вычислительные технологии*. Т. 23. № 4. С. 83-94.
- Лагутин А.А., Волков Н.В., Мордвин Е.Ю.* 2013. Моделирование климата Сибирского региона: результаты модели RegCM4/CLM для 1970-2029 гг. // *Вестник алтайской науки*. № 1. С. 191-197.
- Лагутин А.А., Волков Н.В., Мордвин Е.Ю., Резников А.Н.* 2012. Моделирование климата Западной Сибири: результаты модели RegCM4 // *Известия АлтГУ*. № 1 (73). С. 181-189.
- Лемешко Н.А., Евстигнеев В.П., Морозов А.П., Русаков В.А.* 2021. Применимость данных МОЦАО для оценки агроклиматических условий отдельных территорий // *Системы контроля окружающей среды*. Вып. 3 (45). С. 23-30.
- Официальный электронный каталог моделей CMIP6. 2023 [Электронный ресурс <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/> (дата обращения 12.02.2024)].
- Портал европейского метеорологического агентства Copernicus. 2023 [Электронный ресурс <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview> (дата обращения 12.02.2024)].
- Селянинов Г.Т.* 1928. О сельскохозяйственной оценке климата // *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. Вып. 20. С. 165-177.
- Семенов С.М., Гладильщикова А.А.* 2022. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 8. № 1. С. 75-106.
- Сервис загрузки данных дистанционного зондирования Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA). 2023 [Электронный ресурс <https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=MCD12Q1> (дата обращения 12.02.2024)].
- Силантьева М.М., Елесова Н.В., Терехина Т.А., Гребенникова А.Ю., Овчарова Н.В., Сперанская Н.Ю., Хензен И.* 2021. Гл. 10: Влияние сельскохозяйственного освоения степной и лесостепной зоны Кулунды на распределение растительного покрова и биоразнообразия // *Кулунда: сельское хозяйство и низкоэмиссионные технологии устойчивого землепользования: коллективная монография* / Ред. В.И. Беляев, М.М. Силантьева, А.М. Никулин, А.А. Бондарович. Барнаул: Изд-во Алтайского университета. С. 177-188.
- Специализированные массивы для климатических исследований. 2022 [Электронный ресурс <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml> (дата обращения 12.02.2024)].
- Харламова Н.Ф., Фрюауф М.* 2021. Гл. 3: Изменчивость климата Кулундинской степи // *Кулунда: сельское хозяйство и низкоэмиссионные технологии устойчивого землепользования: коллективная монография* / Ред. В.И. Беляев, М.М. Силантьева, А.М. Никулин, А.А. Бондарович. Барнаул: Изд-во Алтайского университета. С. 27-41.
- Beck H., Zimmermann N., McVicar T., Vergopolan N., Berg A., Wood E.* 2018. Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1-km Resolution // *Scientific Data*. Vol. 5. P. 180214 [Электронный ресурс

- <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214> (дата обращения 12.02.2024)].
- Essa Y.H., Hirschi M., Thiery W., El-Kenawy A.M., Yang Ch.* 2023. Drought Characteristics in Mediterranean under Future Climate Change // *npj Climate and Atmospheric Science*. Vol. 6 [Электронный ресурс <https://www.nature.com/articles/s41612-023-00458-4> (дата обращения 12.02.2024)].
- Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E.* 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization // *Geoscientific Model Development*. Vol. 9. P. 1937-1958.
- FAO. 2021. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point. Synthesis Report 2021. Rome [Электронный ресурс <https://www.fao.org/land-water/solaw2021/en/> (дата обращения 12.02.2024)].
- Friedl M., Sulla-Menashe D.* 2019. MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center [Электронный ресурс <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006> (дата обращения 13.01.2024)].
- Gebrechorkos S.H., Peng J., Dyer E., Miralles D.G., Vicente-Serrano S.M., Funk C., Beck H.E., Asfaw D.T., Singer M.B., Dadson S.J.* 2023. Global High-Resolution Drought Indices for 1981-2022 // *Earth System Science Data*. Vol. 15. P. 5449-5466.
- Giorgi F., Coppola E., Solmon F., Mariotti L., Sylla M.B., Bi X., Elguindi N., Diro G.T., Nair V., Giuliani G., Turuncoglu U.U., Cozzini S., Güttler I., O'Brien T.A., Tawfik A.B., Shalaby A., Zakey A.S., Steiner A.L., Stordal F., Sloan L.C., Brankovic C.* 2012. RegCM4: Model Description and Preliminary Tests over Multiple CORDEX Domains // *Climate Research*. Vol. 52. P. 7-29.
- Khan V.M., Vil'fand R.M., Tishchenko V.A., Emelina S.V., Gritsun A.S., Volodin E.M., Vorobyeva V.V., Tarasevich M.A.* 2023. Assessment of Changes in the Temperature Regime of Northern Eurasia for the Next Five Years According to the INM RAS Earth System Model Forecasts and Their Possible Consequences for Agriculture // *Russian Meteorology and Hydrology*. Vol. 48. P. 745-754.
- Lagutin A.A., Volkov N.V., Makushev K.M., Mordvin E.Yu.* 2017. The Global Climate Change Effect on the Altai Region's Climate in the First Half of XXI Century // *Proceedings of SPIE, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Vol. 10466. No. 104666R.
- Lagutin A.A., Volkov N.V., Makushev K.M., Mordvin E.Yu.* 2016. Validation of the RegCM4/CLM4.5 Regional Climate Modeling System over the Western Siberia // *Proceedings of SPIE, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Vol. 10035. No. 100356P.
- O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G.A., Moss R., Riahi K., Sanderson B.M.* 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geoscientific Model Development*. Vol. 9. P. 3461-3482.
- The IPCC Finalized the First Part of the Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC [Электронный ресурс https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf (дата обращения 21.02.2024)].
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP). 2016. Handbook of Drought Indicators and Indices // *Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*. Geneva.) / Eds. M. Svoboda, B.A. Fuchs [Электронный ресурс https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf (дата обращения 12.02.2024)].