

Изменение климата и его влияние на сельское хозяйство

Ю. П. Переведенцев*, А. А. Васильев**

Представлен обзор работ, посвященных анализу происходящих и будущих изменений климата на территории России и их влияния на продуктивность сельскохозяйственных культур. С использованием данных реанализа за 1950—2020 гг. дана оценка тенденции изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков в разных регионах России. Выявлена корреляция между изменениями температуры и индексами атмосферной циркуляции.

Ключевые слова: изменение климата, агроклиматические ресурсы, температура воздуха, атмосферные осадки, циркуляция атмосферы, адаптация.

DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-5-13

Проблема происходящих и ожидаемых глобальных и региональных изменений климата актуальна для мирового сообщества в связи с появлением климатических угроз и необходимостью адаптации к происходящим климатическим изменениям. Во всем мире увеличивается риск ущерба сельскохозяйственному производству от опасных погодных и климатических явлений [7].

Россия является одним из основных производителей и экспортеров сельскохозяйственной продукции и играет ведущую роль на мировом рынке зерна. Зерновая отрасль — основа устойчивого развития большинства областей агропромышленного комплекса и аграрного экспорта, поэтому оценка зерновых и зернобобовых ресурсов страны является стратегической задачей в экономике государства [5]. Однако зависимость от условий погоды делает производство сельскохозяйственной продукции нестабильным. В настоящее время наблюдается увеличение засушливости в большей части сельскохозяйственных регионов России, что негативно влияет на валовый сбор урожая зерновых культур [13].

В связи с резкой континентальностью климата на преобладающей территории Российской Федерации из всех опасных гидрометеорологических природных явлений наиболее значительное воздействие на урожайность и валовые сборы зерна оказывают засухи [20].

* Ответственный редактор тематического номера; Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: urereved@kpfu.ru (Переведенцев Юрий Петрович).

**Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации; e-mail: hmc@tescom.ru (Васильев Александр Александрович).

По данным Национального союза агрострахования, в России основными рисками, которые привели к страховым выплатам в 2012—2018 гг., стали почвенная засуха (22,2% объема выплат), атмосферная засуха (21,7%), суховей (19,5%), переувлажненные почвы (16,6%) [1].

Согласно работе [12], при производстве сельскохозяйственных культур особую важность приобретает оценка климатического риска, поскольку зависимость результатов производства от случайных (прежде всего метеорологических) факторов здесь особенно велика. В связи с этим возникает потребность в достоверных количественных оценках влияния погоды и климата на продуктивность зерновых культур, которые позволили бы оценить климатические риски и уязвимость территории. Климатические риски крупных неурожаев (R) предлагаем определять как произведение повторяемости неблагоприятных гидрометеорологических условий и уязвимости сельскохозяйственного производства на конкретной территории:

$$R = pV,$$

где p — повторяемость опасного гидрометеорологического явления (%); V — уязвимость сельскохозяйственного производства (безразмерная величина).

Факторы уязвимости сельского хозяйства российских регионов, расположенных в разных природных и климатических зонах, заметно различаются. Для северных и влажных регионов к факторам уязвимости можно отнести заморозки, образование ледяной корки, избыточное увлажнение, в южных и сухих регионах — это волны тепла, засухи, суховеи, пыльные бури. Неблагоприятным следствием глобального потепления является повышение засушливости климата на значительной части территории России. Увеличение частоты засух наблюдается не только в регионах с прогнозируемым уменьшением количества осадков, но и в областях, где количество осадков увеличивается вследствие изменений климата.

Как следует из Третьего оценочного доклада Росгидромета, на территории России в последние десятилетия теплеет почти вдвое быстрее, чем в Северном полушарии: на $0,51^\circ\text{C}$ за десятилетие, при этом каждое десятилетие с 1981—1990 гг. теплее предыдущего [19].

В связи с этим рассмотрим с использованием данных реанализа ERA5 за 1950—2020 гг. пространственно-временные особенности температурного режима в нижнем слое атмосферы, находящемся под непосредственным влиянием подстилающей поверхности, атмосферной циркуляции и радиационного режима. Для этого по всей континентальной территории России, а также в девяти квазиоднородных климатических регионах России (I — север европейской части России (ЕЧР) и Западной Сибири, II — северная часть Восточной Сибири и Якутии, III — Чукотка и север Камчатки, IV — центр ЕЧР, V — центр и юг Западной Сибири, VI — центр и юг Восточной Сибири, VII — Дальний Восток, VIII — Алтай и Саяны, IX — юг ЕЧР) проведено осреднение средних месячных, средних годовых, летних и зимних значений температуры воздуха. Для указанных регионов и временных интервалов рассчитаны основные статистические характеристики (среднее многолетнее значение, среднее квадратическое отклонение (СКО), коэффициент наклона линейного тренда, коэффициент детермина-

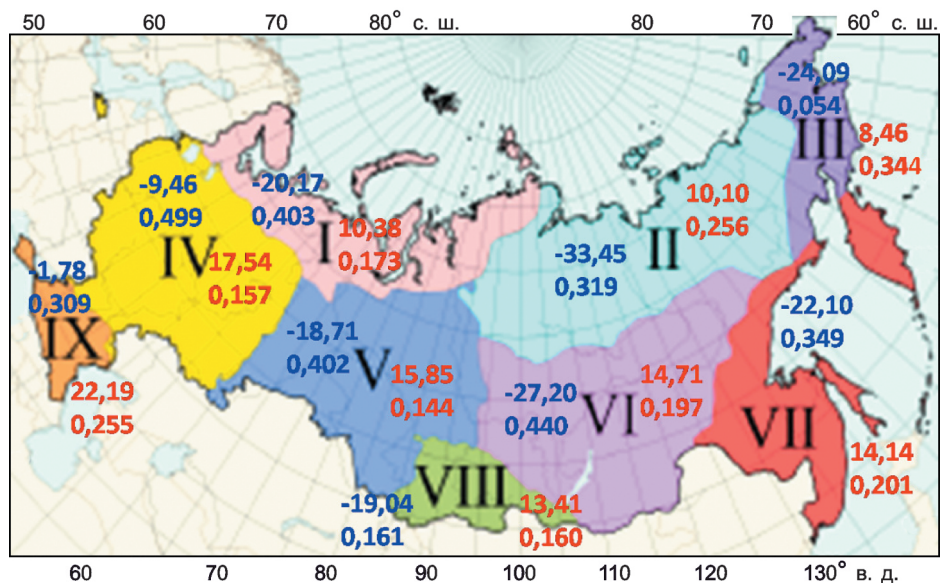


Рис. 1. Средние за 1950—2020 гг. летние и зимние значения приземной температуры ($^{\circ}\text{C}$) и значения коэффициента наклона линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$) в квазиоднородных климатических регионах России.

ции линейного тренда и др.) и проведено сглаживание временных рядов с помощью низкочастотного фильтра с точкой отсечения 20 лет. На рис. 1 представлено распределение средних зимних и средних летних значений температуры и коэффициента наклона линейного тренда для девяти регионов России.

Анализ характеристик низкочастотных изменений зимней (декабрь — февраль) температуры воздуха у поверхности земли показывает, что с 1950 по 2020 г. в среднем по всей территории Российской Федерации эти значения температуры увеличивались в линейном приближении со скоростью около $0,38^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$. При этом наибольшая скорость повышения зимней температуры ($0,5^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$) наблюдалась в IV регионе, включающем в себя центр ЕЧР. В результате за исследуемый период температура здесь повысилась на $3,5^{\circ}\text{C}$, если определять это изменение по линейному тренду, и на $2,6^{\circ}\text{C}$, если оценивать его по низкочастотному компоненту с периодом более 20 лет. Наибольший вклад в общую дисперсию (22%) линейный рост температуры вносит в VII регионе (Дальний Восток), где наблюдается наименьшая изменчивость зимних значений температуры ($\text{СКО} = 1,46^{\circ}\text{C}$). Линейный тренд в изменении значений зимней температуры практически отсутствует в III (Чукотка и север Камчатки) и VIII (Алтай и Саяны) регионах. Это связано с тем, что в III регионе активное увеличение значений зимней температуры началось лишь в последние 20 лет, а в VIII повышение температуры зимнего периода в конце 1990-х годов сменилось даже некоторым ее понижением.

Летом (июнь — август) в среднем по территории Российской Федерации значения температуры у поверхности земли росли существенно слабее, коэффициент наклона линейного тренда составил $0,20^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$. При

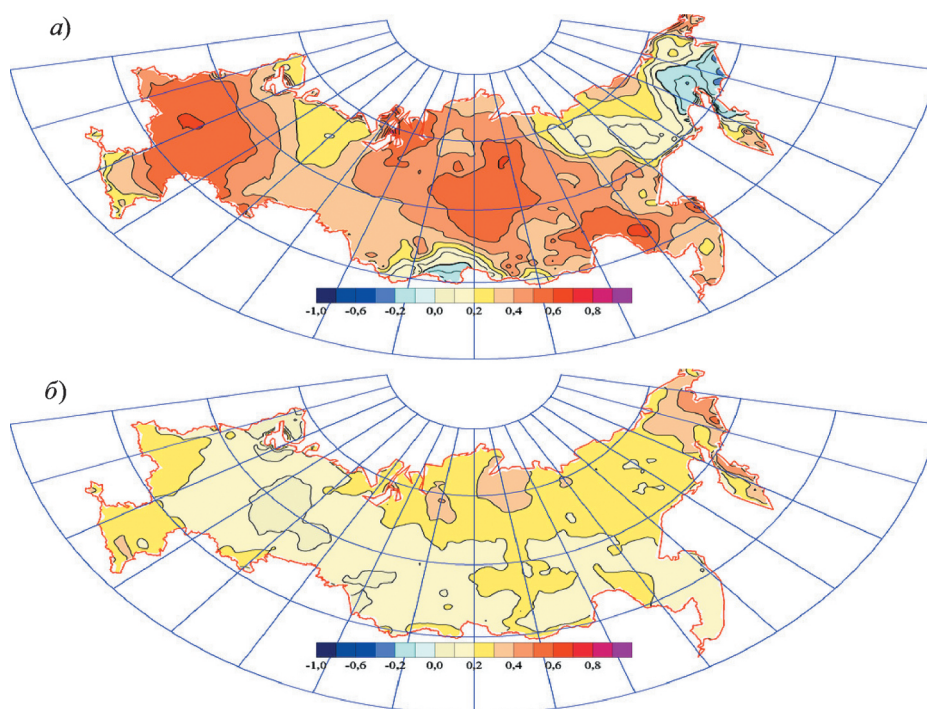


Рис. 2. Значения коэффициента наклона линейного тренда (1950—2020 гг.) приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$) в январе (а) и в июле (б) по данным ERA5.

этом наибольшая скорость повышения летней температуры в линейном приближении наблюдалась в III регионе ($0,34^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$), где в зимний период линейный тренд незначим. Также достаточно велик коэффициент наклона линейного тренда летней температуры воздуха во II и IX районах, где он составил около $0,26^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$. Наименее выражено летнее повышение температуры в IV регионе, где зимой ее повышение, наоборот, максимально. Это связано с тем, что в период до конца 1970-х годов летом температура в этом регионе заметно понижалась, затем до 2012 г. наблюдался ее рост, и в последние годы вновь происходит ее понижение.

Таким образом, в большинстве регионов России повышение температуры воздуха в зимний период больше, чем летом. Исключением являются регион центра ЕЧР и регион Алтая и Саян, где по линейному тренду скорость повышения зимних и летних значений температуры практически одинакова, а по кривой низкочастотной составляющей повышение температуры даже несколько больше. Те же статистические характеристики были рассчитаны в узлах сетки с шагом 1° по широте и долготе для территории континентальной России. По результатам, представленным в картографическом виде (рис. 2), выполнен анализ особенностей пространственного распределения и временной изменчивости температуры воздуха. На рисунке видно, что в зимний период процесс потепления происходит интенсивнее, чем в летний.

С целью оценки роли циркуляционного фактора в формировании термического режима на территории Российской Федерации производилась оценка корреляции между колебаниями температуры воздуха и индексами атмосферной циркуляции.

Временные ряды индексов атмосферной циркуляции североатлантического колебания (NAO), колебания Восточная Атлантика — Западная Россия (EAWR), скандинавского колебания (Scand) характеризуют колебания основных барических центров в Атлантико-Европейском секторе, влияющих на изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России. Атлантическая мультдесятилетняя осцилляция (АМО), связанная с аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) и переносом океанического тепла в Северной Атлантике, формирует аномалии климата в Европейском секторе в десятилетнем и междесятилетнем временном масштабе. Для оценки влияния циркуляции атмосферы на термический режим России рассчитывались коэффициенты корреляции r для всех месяцев в период 1976—2019 гг. между временными рядами индексов циркуляции (АО, NAO, EAWR, Scand) и температурой воздуха на 26 станциях, распределенных по всей территории России. Выявились следующие закономерности: с индексом NAO лучше всего коррелирует температура воздуха северо-запада ЕЧР в период декабрь — март (в марте величина r для Санкт-Петербурга достигает 0,75), а также центра ЕЧР. Арктическая осцилляция (АО) оказывает наибольшее воздействие также в холодный период, при этом высокая корреляция отмечается в регионах Сибири и Дальнего Востока (в марте для Владивостока $r = 0,61$). Следовательно, циркуляционные моды NAO и АО способствуют формированию положительных аномалий температуры воздуха в холодный период.

Циркуляционная мода EAWR наиболее сильное отрицательное воздействие оказывает на ЕЧР и Уральский регион в период апрель — октябрь (так, для Казани в сентябре r достигает значения $-0,78$), тем самым способствуя понижению температуры воздуха в теплый период. Наиболее активное влияние на Поволжье, Предуралье, южную часть Западной Сибири оказывает скандинавское колебание ($r < 0$). Так, температура воздуха сибирских станций Енисейск, Новосибирск, Барнаул имеет тесные связи с индексом Scand в течение всего года ($r = -0,73$ для Барнаула в декабре). Это проявилось в отрицательных трендах температуры на юге Западной Сибири и на Алтае в зимний период 1976—2019 гг. и в течение всего года на юге Западной Сибири в 2001—2019 гг. Территория с отрицательным трендом температуры воздуха в январе 2001—2019 гг. занимает практически всю ЕЧР, Уральский регион и юг Западной и Средней Сибири, что подтверждает роль скандинавского колебания в понижении температуры воздуха в этих регионах.

Колебание АМО способствует формированию долгопериодных аномалий температуры в рамках как всего Северного полушария, так и ЕЧР. Прослеживается колебательный режим температуры воздуха, осредненной по Северному полушарию и ЕЧР, до середины 1970-х годов, далее преобладающую роль в потеплении климата играет парниковый эффект.

Были рассчитаны синхронные корреляции между температурой воздуха на 150 станциях, расположенных на всей территории Российской Федера-

ции, и индексом АМО для периода 1966—2020 гг. Наибольшими значениями r оказались при расчетах по среднегодовым данным. Более тесная связь обнаружена для центра и юга ЕЧР, юга Западной Сибири и Чукотки (значения r до 0,61). В то же время в ряде регионов (север ЕЧР, центр Средней Сибири и др.) связи оказались слабыми.

Результаты представленного анализа региональных климатических изменений в последние десятилетия и роли циркуляционного фактора в целом согласуются с основными выводами ранее выполненных работ [24—27].

Региональные особенности изменения режима осадков в период 1976—2019 гг. на территории России рассмотрены, в частности, в работе [15]. Анализ трендов, построенных по годовым суммам осадков за 1976—2019 гг., свидетельствует об увеличении количества осадков на большей части территории России. Уменьшение сумм осадков наблюдается в центре и на юге ЕЧР, на Северном Кавказе, где коэффициент наклона линейного тренда равен $-10...-14$ мм/год. В период 2001—2019 гг. контрастность в распределении атмосферных осадков по территории России усилилась. Так, в Западной и Средней Сибири наблюдается уменьшение сумм осадков, в то же время годовое количество осадков возросло в восточных районах России. Отмечается тенденция уменьшения сумм осадков и, следовательно, роста засушливости в южной половине ЕЧР.

Следует отметить, что в специальной литературе проблеме возникновения атмосферной засухи и ее негативным последствиям для сельского хозяйства уделено большое внимание. Так, в работе [21] дан анализ динамики опасной атмосферной засухи на юго-востоке ЕЧР за период 1936—2010 гг.; отмечено, что к концу XXI в., согласно климатическим сценариям глобального потепления, сохранится тенденция увеличения частоты, продолжительности и площади опасных атмосферных засух на территории юга Русской равнины. В более поздней работе [23] показано, что современные и прогнозируемые изменения климата создают значительные риски для развития российского агросектора. Ожидается, что южная граница короткопериодных засух продолжительностью 5—10 дней за месяц будет смещаться к северу. В регионах, где конец XX в. характеризовался короткопериодными засухами, прогнозируется их переход в градацию продолжительных засух (более 20 дней в месяц), а также увеличение рисков повреждения посевов.

При этом отмечается, что климат зернопроизводящих регионов юга России на протяжении последних десятилетий характеризуется увеличением повторяемости и продолжительности метеорологических засух.

В работе [10] дана оценка влияния ожидаемых изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур на протяжении XXI в. на территории России, полученная по новым климатическим сценариям. Общий вывод сводится к следующему: если к середине XXI в. глобальное потепление приведет к росту биоклиматического потенциала территории России на 3,9—11,1% по сравнению с современным уровнем, то к концу века уровень биоклиматического потенциала может снизиться на 7%, что может привести к потере продуктивности зерновых культур в России на 16—18%.

С учетом необходимости адаптации человека и экономики, включая агропромышленный комплекс, к происходящим и будущим климатическим изменениям становится актуальной проблема оценки будущих изменений климата на обширной территории России [6, 22]. Согласно работе [22], ансамблевые оценки будущих изменений климата, полученные с использованием наиболее совершенных климатических моделей, показывают, что на рубеже текущего и следующего веков засушливость климата может создать целую серию новых угроз развитию многих регионов страны. В то же время в XXI в. под влиянием глобального потепления в большинстве регионов России ожидается формирование более мягкого и влажного климата по сравнению с последними десятилетиями.

В синоптической практике отмечено, что с началом периода глобального потепления климата количество ультраполярных вторжений стало уменьшаться и в настоящее время они почти совсем прекратились. Теперь холодные антициклоны стали перемещаться не с Карского моря, а с территории Гренландии на Скандинавию, центр ЕЧР и далее на Казахстан и лишь краем задевают Северный Кавказ. Такие траектории отмечались и ранее, но теперь они стали превалировать. Воздух, сформировавшийся над Гренландией в таких антициклонах, менее холодный и более влажный, поэтому зимы стали теплее, а май — более холодным и влажным. Сильные весенние засухи в течение последних 10 лет вообще не отмечались на территории ЕЧР. Последнее экстремально холодное ультраполярное вторжение наблюдалось в конце декабря 1979 г. и привело к гибели не только озимых культур, но и плодовых деревьев. В связи с этим народная примета “май холодный — год хлебородный” почти всегда оправдывается. При холодном мае, как правило, выпадают осадки, так необходимые для успешного роста зерновых сельскохозяйственных культур. Отметим, что это справедливо только для ЕЧР. В Сибири таким критическим для урожая месяцем следует считать июнь, поскольку там посев яровых проводится позже.

Изменения климата находят отражение в динамике агроклиматических ресурсов регионов России за последние десятилетия. В работах [1—4, 8, 9, 11, 16—18] дана оценка динамики показателей термического и влажностного режима в ряде сельскохозяйственных регионов России, погодно-климатических рисков при возделывании сельскохозяйственных культур.

Показано, что начало вегетационного периода сдвигается на более ранние сроки, увеличивается сумма эффективных температур, уменьшается количество летних осадков в зернопроизводящих регионах России. Рассчитанные линейные тренды индекса сухости М. И. Будыко имеют тенденцию к росту, а гидротермического коэффициента Селянинова — к уменьшению, что свидетельствует об увеличении засушливости климата. В целом по России тенденции к потеплению привели к снижению климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы примерно на 12% с 1976 по 2015 г., т. е. на ~3% за десятилетие [14].

С учетом важности проблемы обеспечения продовольственной безопасности страны в условиях изменяющегося климата, роли климатических факторов в формировании продуктивности сельскохозяйственных культур возникла необходимость выпуска тематического номера журнала “Метео-

рология и гидрология” — “Современные климатические изменения и их последствия для агросферы”.

В этом выпуске представлен цикл работ по оценке происходящих и будущих изменений климата на территории России, динамики агроклиматических ресурсов. Особое внимание уделено природным условиям формирования летних засух, оказывающих негативное влияние на сельскохозяйственное производство, оценке агроклиматических условий перезимовки озимых зерновых культур и ряда других факторов, способствующих получению объективной картины уязвимости регионов России к негативным погодным явлениям и климатическим рискам, возникающих при возделывании сельскохозяйственных культур.

Результаты исследований, содержащиеся в данном сборнике, свидетельствуют о неоднозначном влиянии глобальных изменений климата на особенности общей циркуляции в разных регионах России. В то же время именно эти особенности влияют на развитие атмосферных процессов, благоприятных или неблагоприятных для того или иного вида хозяйственной деятельности, в частности для сельского хозяйства. В связи с этим требуется детальное изучение региональных изменений климата с целью разработки методов их прогнозирования.

Статья подготовлена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-27-20080).

Литература

- 1. Агрострахование:** новые горизонты. — Годовой отчет, 2018, 52 с.
- 2. Биоклиматический потенциал России:** методы мониторинга в условиях изменяющегося климата. /Под ред. А. В. Гордеева. — М., Типография Россельхозакадемии, 2007, 236 с.
- 3. Вильфанд Р. М., Страшная А. И., Береза О. В.** О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур. — Труды Гидрометцентра России, 2016, вып. 360, с. 45—78.
- 4. Галимова Р. Г., Переведенцев Ю. П., Яманаев Г. А.** Агроклиматические ресурсы Республики Башкортостан. — Вестник Воронеж. гос. ун-та. Серия География. Геоэкология, 2019, № 3, с. 29—39.
- 5. Грингоф И. Г., Найдина Т. А.** Динамико-статистический метод прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по Республике Крым. — Гидрометеорология и образование, 2020, № 4, с. 65—74.
- 6. Груза Г. В., Ранькова Э. Я.** Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. — Обнинск, ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2012, 194 с.
- 7. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации.** /Под ред. В. М. Катцова. — СПб, 2017, 106 с.
- 8. Клещенко А. Д., Савицкая О. В.** Оценка средней урожайности посевов зерновых и погодообусловленные риски. — Гидрометеорология и образование, 2021, № 1, с. 50—63.
- 9. Насонов Д. В.** Климатические риски и адаптация земледелия. — Сельскохозяйственные вести, 2011, № 1, с. 36—37.
- 10. Павлова В. Н.** Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI веке. — Труды ГГО, 2013, вып. 569, с. 20—37.
- 11. Павлова В. Н., Варчева С. Е.** О выборе гидрометеорологических индексов для системы агрострахования. — Гидрометеорология и образование, 2020, № 4, с. 75—86.
- 12. Павлова В. Н., Варчева С. Е.** Оценка климатических рисков при производстве зерновых культур в Приволжском федеральном округе. — Агрофизика, 2017, № 2, с. 1—8.

- 13. Павлова В. Н., Каланка П., Караченкова А. А.** Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия. — *Метеорология и гидрология*, 2020, № 1, с. 78—94.
- 14. Павлова В. Н., Караченкова А. А.** Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России. — *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2020, № 4, с. 70—91.
- 15. Переведенцев Ю. П., Васильев А. А., Шерстюков Б. Г., Шанталинский К. М.** Климатические изменения на территории России в конце XX — начале XXI века. — *Метеорология и гидрология*, 2021, № 10, с. 14—26.
- 16. Переведенцев Ю. П., Павлова В. Н., Шанталинский К. М., Мирсаева Н. А., Николаев А. А., Тагиров М. Ш.** Агроклиматические условия на территории Республики Татарстан в период 1966—2021 гг. — *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2022, № 4, с. 96—113.
- 17. Переведенцев Ю. П., Шарипова Р. Б., Важнова Н. А.** Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур. — *Вестник Удмуртского ун-та. Серия Биология. Науки о Земле*, 2012, № 2, с. 120—126.
- 18. Сиротенко О. Д., Грингоф И. Г.** Оценка влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство Российской Федерации. — *Метеорология и гидрология*, 2006, № 8, с. 92—101.
- 19. Третий** оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — СПб, Научное издание, 2022, 124 с.
- 20. Фролов А. В., Страшная А. И.** О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур. /В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. — М., Триада, лтд, 2011, с. 22—31.
- 21. Черенкова Е. А.** Динамика опасной атмосферной засухи в Европейской России. — *Метеорология и гидрология*, 2007, № 11, с. 14—25.
- 22. Школьник И. М., Мелешко В. П., Кароль И. Л., Киселев А. А., Надежина Е. Д., Говоркова В. А., Павлова Т. В.** Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. — *Труды ГГО*, 2014, вып. 575, с. 67—117.
- 23. Школьник И. М., Надежина Е. Д., Стерзат А. В., Пикалева А. А., Егоров Б. Н.** Моделирование эволюции засушливых условий в XXI веке для обоснования мер адаптации агросектора России к климатическим воздействиям. — *Метеорология и гидрология*, 2022, № 5, с. 107—122.
- 24. Perevedentsev Y. P. and Shantalinskii K. M.** Changes in the near-surface surface air temperature the Northern Hemisphere during the period of 1850–2014. — *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Ser. Estestvennye Nauki*, 2015, vol. 157, No. 3, pp. 8—19.
- 25. Perevedentsev Yu. P., Shantalinskii K. M., Aukhadееv T. R., Ismagilov N. V., and Zandi R.** Effect of macrocirculation systems on the thermobaric conditions of the Volga Federal District. — *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Ser. Estestvennye Nauki*, 2014, vol. 156, No. 2, pp. 156—169.
- 26. Perevedentsev Yu. P., Vereshchagin M. A., Naumov E. P., and Shantalinskii K. M.** Long-term variations main characteristics of the hydrometeorological Volga basin regime. — *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, No. 10, pp. 9—15.
- 27. Perevedentsev Yu. P., Vereshchagin M. A., Naumov E. P., Shantalinskiy K. M., and Nikolaev A. A.** Regional display of the modern climate warming in tropo- and stratospheres of the Northern Hemisphere. — *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2005, No. 6, pp. 6—16.