

Оригинальная статья / Original article  
УДК 631.11: 631.5: 631.81: 574.2  
DOI: 10.18470/1992-1098-2023-1-117-125

# Богарное земледелие в степной и лесостепной зоне бассейна Урала и адаптация агротехнологий к изменяющейся влагообеспеченности, как способ сохранения ресурсов поверхностных вод

Юрий А. Гулянов, Александр А. Чибилев

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, Оренбург, Россия

## Контактное лицо

Александр А. Чибилев, академик Российской академии наук, научный руководитель Института степи Уральского отделения РАН; 460000 Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11. Тел. +7(3532)774432

Email [orensteppe@mail.ru](mailto:orensteppe@mail.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6214-1437>

## Формат цитирования

Гулянов Ю.А., Чибилев А.А. Богарное земледелие в степной и лесостепной зоне бассейна Урала и адаптация агротехнологий к изменяющейся влагообеспеченности, как способ сохранения ресурсов поверхностных вод // Юг России: экология, развитие. 2023. Т.18, N 1. С. 117-125. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-1-117-125

Получена 12 сентября 2022 г.

Прошла рецензирование 31 октября 2022 г.

Принята 12 декабря 2022 г.

## Резюме

**Цель.** Определение связи урожаев зерна озимой пшеницы с метеорологическими параметрами. Выявление их динамики и современного уровня. Подбор и научное обоснование адаптивных приёмов агротехники.

**Материал и методы.** Ретроспективный анализ метеорологических условий и валовых сборов озимой пшеницы стандартными методами корреляционного и регрессионного анализа. Определение силы связи между данными отдельных массивов. Выявление совместной вариации результативных и факторных признаков путём попарного сравнения их временных рядов.

**Результаты.** Выявлено шесть совместных вариаций временных рядов результативных (валовой сбор зерна) и факторных признаков (гидротермические условия периодов вегетации и структурные показатели посевов) со средней и высокой теснотой корреляционной связи, выраженной в виде уравнений множественной регрессии.

**Заключение.** Результаты проведённых исследований свидетельствуют о тесной прямой связи валовых сборов зерна с урожайностью с уборочной площади ( $r = 0,79$ ), в свою очередь обратно зависимой (в средней степени) от суммы активных температур воздуха всего периода от посева до уборки ( $r = 0,64$ ). Из осадков различных периодов вегетации преимущественное прямое влияние на урожайность зерна оказывают осадки холодного периода года ( $r = 0,49$ ) и всего активного периода вегетации от начала парования до уборки ( $r = 0,39$ ). Влияние сумм осадков за отдельные короткие периоды вегетации значительно ниже. В сложившихся условиях стабильность производства зерна озимой пшеницы будет определяться адаптивностью агротехнологий к повышающейся засушливости климата, значительно ухудшающей влагообеспеченность растений.

## Ключевые слова

Оптимизация природопользования, климатические изменения, влагообеспеченность посевов, озимая пшеница, методы адаптации.

# Rain-fed agriculture in the steppe and forest-steppe zone of the Ural River basin and the adaptation of agricultural technologies to changing moisture availability as a way to preserve surface water resources

Yuriy A. Gulyanov and Alexander A. Chibilev

Steppe Institute, Orenburg Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

## Principal contact

Alexander A. Chibilev, Academician, Russian Academy of Sciences, Scientific Director, Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; 11 Pionerskaya St, Orenburg, Russia 460000.

Tel. +7(3532)774432

Email [orensteppe@mail.ru](mailto:orensteppe@mail.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6214-1437>

## How to cite this article

Gulyanov Yu.A., Chibilev A.A. Rain-fed agriculture in the steppe and forest-steppe zone of the Ural River basin and the adaptation of agricultural technologies to changing moisture availability as a way to preserve surface water resources. *South of Russia: ecology, development*. 2023, vol. 18, no. 1, pp. 117-125. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2023-1-117-125

Received 12 September 2022

Revised 31 October 2022

Accepted 12 December 2022

## Abstract

**Aim.** The aim of the research was to determine the relationship of winter wheat grain yields with meteorological parameters, the determination of the dynamics and current level and the selection and scientific justification of adaptive agricultural technologies.

**Material and Methods.** Retrospective analysis was undertaken of meteorological conditions and gross winter wheat harvests by standard methods of correlation and regression analysis. The strength of the connection between the data of individual arrays was determined, as well as the identification of joint variation of productive and factorial features by pairwise comparison of their time series.

**Results.** Six joint variations of time series of productive (gross grain harvest) and factorial features (hydrothermal conditions of vegetation periods and structural indicators of crops) with medium and high closeness of correlation, expressed in the form of multiple regression equations, were revealed.

**Conclusion.** The results of the studies indicate a close direct relationship between gross grain harvest and yield from the harvesting area ( $r = 0.79$ ), which in turn is inversely dependent (to an average degree) on the sum of the active air temperatures of the entire period from sowing to harvesting ( $r = 0.64$ ). Из осадков различных периодов вегетации преимущественное прямое влияние на урожайность зерна оказывают осадки холодного периода года ( $r = 0.49$ ) и всего активного периода вегетации от начала парования до уборки ( $r = 0.39$ ). Of the precipitation of different periods of vegetation, the predominant direct effect on grain yield is exerted by precipitation during the cold period of the year ( $r = 0.49$ ) and the entire active period of vegetation from the beginning of fallow to harvest ( $r = 0.39$ ). The effect of amounts of precipitation for certain short periods of vegetation is much lower. Under current conditions, the stability of winter wheat grain production will be determined by the adaptability of agricultural technologies to the increasing aridity of the climate, which significantly worsens the moisture supply of plants.

## Key Words

Nature management optimization, climate change, water availability of crops, winter wheat, adaptation methods.

**ВВЕДЕНИЕ**

В условиях крайне обостренных экологических проблем, порожденных длительной практикой экстенсивного землепользования, ощутимые климатические изменения, выражающиеся в повышении засушливости климата, предполагают оперативную разработку действенных мер по адаптации к ним современного земледелия. В первую очередь это касается совершенствования технологий возделывания зерновых хлебных культур (пшеницы, кукурузы и др.) с учётом изменяющейся влагообеспеченности посевов.

Пшеница относится к числу самых распространённых хлебных культур, определяющих продовольственную безопасность растущего населения Земли и являющейся весомой составляющей мировой торговли. По объёмам среднегодового производства (2019 г.) пшеница занимает третью строчку в рейтинге важнейших видов зерновых культур (734 млн т), после риса (782 млн т) и кукурузы (1,14 млрд т).

Основными производителями пшеницы традиционно считаются страны Азиатско-Тихоокеанского региона (из которых около трети валового сбора получают в Китае и Индии – 130,0 и 100,0 млн т) и Россия, обеспечивающая до 10,0% мирового сбора (72,1 млн т). Лидером среди европейских стран является Франция (35,8 млн т). В Северной Америке больше всего пшеницы выращивают в США (51,3 млн т), на Ближнем Востоке – в Турции (20,0 млн т), из африканских стран – в Египте (8,8 млн т), из латиноамериканских – в Аргентине (18,5 млн т) [1].

Доля экспортного зерна из России на мировом рынке достигает 6%, а 70% в общей стоимости зернового экспорта страны составляет выручка от продажи пшеницы.

Признанными житницами пшеничного зерна в России являются регионы Южного (21,0 млн т) и Центрального (15,1 млн т) федеральных округов. В Приволжском федеральном округе, вносящем в российский урожай около 12,0 млн т, наибольшими сборами выделяются республики Башкортостан, Татарстан, Саратовская и Оренбургская области. В Оренбургской области, ежегодно собирающей около 1,5 млн т или 2,3% от урожая по стране, на больших площадях возделывается и яровая, и озимая пшеница, занимающая восточнее (в Зауралье и Сибири), уже несопоставимо меньшие с яровой пшеницей площади [2].

Озимая пшеница является культурой высокого земледелия, хорошо отзываящаяся на оптимизацию и интенсификацию факторов внешней среды и значительно снижающая реализацию биологического потенциала продуктивности при их лимитировании.

Как известно, основными факторами жизнеобеспеченности озимой пшеницы являются условия водного, минерального питания и термический режим почвы и воздуха. Обеспеченность растений минеральными питательными элементами определяется уровнем почвенного плодородия, а водный и термический режимы чаще зависят от метеорологических параметров, особенно в регионах сухостепной зоны [3].

На формирование 1 г сухого вещества в начале вегетации посевы озимой пшеницы расходуют до 800–1000 г воды. С возрастом этот показатель

(транспирационный коэффициент) постепенно снижается и к завершению вегетации обычно составляет 150–200 единиц, при средних за вегетацию значениях 450–550 единиц [4]. Наиболее подходящие условия влагообеспеченности для формирования высоких урожаев складываются при влажности почвы в корнеобитаемом слое на уровне 70–75% от предельной полевой влагоёмкости. Высокая потребность в воде отмечается сразу же после посева. Только для набухания и прорастания семян требуется до 45–50% воды от массы самих семян. Наибольшее количество влаги посевы расходуют в период максимального развития вегетативной массы и формирования репродуктивных органов – в фазы выхода в трубку и цветения. Высокая потребность в воде сохраняется и после цветения, в период формирования и созревания зерна [5].

Отношение озимой пшеницы к теплу характеризуется суммой активных температур, управляющих длительностью этапов органогенеза, и устойчивостью к низким температурам, определяющей жизнеспособность растений в период зимовки. Общая потребность озимой пшеницы в тепле определяется суммой положительных температур от посева до полной спелости зерна, составляющей в среднем 1850–2200°C. Зоной экологической валентности считается температурный интервал от 4–5°C до 37–40°C, за пределами которого затрудняется пророст сухого вещества. В зимний период озимая пшеница способна переносить кратковременное понижение температуры почвы в зоне узла кущения до минус 16°C – минус 18°C. Лучше перезимовывают хорошо развившиеся с осени посевы, прошедшие закалку и укрытые снегом.

Озимая пшеница достаточно чувствительна к абиотическим стрессам. Различные неблагоприятные погодные условия могут значительно снижать валовые сборы зерна [6–8] и сопровождаться ощутимыми финансовыми издержками [9]. К примеру, длительные летние периоды без дождей, особенно накануне посева, становятся причиной иссушения верхнего слоя почвы, снижения полевой всхожести семян, получения недружных, слабых всходов. Критически низкие температуры в бесснежные и малоснежные зимы могут приводить к массовой гибели растений, изреженности продуктивного стеблестоя и существенному снижению урожайности [10]. Продолжительная засуха в весенне-летний период замедляет рост вегетативной массы, особенно листьев, ускоряет их старение, что приводит к снижению эффективности использования солнечной радиации [11]. Чрезвычайно высокие температуры в период цветения, как правило, сопровождаются уменьшением количества зёрен в колосе, вызывая фертильность цветков [12; 13]. При наливе зерна в отсутствие достаточного количества атмосферной и почвенной влаги это становится причиной формирования не полностью сформировавшегося, мелкого и щуплого зерна с низкими качественными показателями [14; 15].

Как видно из представленной информации, мировым научным сообществом достаточно активно прорабатываются биологические особенности озимой пшеницы, выявляется зависимость урожайного потенциала от метеорологических параметров территорий возделывания. Не менее активно такие

исследования проводятся и в основных зернопроизводящих регионах России.

В степном Оренбуржье, на наш взгляд, таких исследований проведено ещё недостаточно, особенно в условиях меняющегося климата. Не выработана стратегия адекватного технологического ответа на природные и антропогенные вызовы, исключающего орошение из-за отсутствия достаточных ресурсов поверхностных вод и его негативные последствия, выражающиеся в значительном повышении затратности и усилении техногенной нагрузки, активизации засоления и эрозионных процессов. К тому же, обустройство примитивных полуправильных водозаборов и неконтролируемый сброс оросительных вод, как это зачастую наблюдается в пустынной зоне низовий Урала, дополнительно сопровождается катастрофическим загрязнением и разрушением берегов реки.

Цель настоящих исследований заключалась в определении связи урожая зерна озимой пшеницы в отдельных административных районах Заволжской степной провинции с метеорологическими параметрами, выявлении их динамики, современного уровня, подборе и научном обосновании адаптивных приёмов богарной агротехники.

Для выполнения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- актуализировать представления о биологических особенностях озимой пшеницы и влиянии метеорологических параметров на формирование урожая;
- определить связь структурных элементов урожая с гидротермическими условиями периодов вегетации и выявить метеорологические факторы, в наибольшей степени влияющие на реализацию урожайного потенциала;
- провести ретроспективный анализ гидротермических условий отдельных периодов вегетации, выявить их динамику и определить современные параметры;
- обосновать направления адаптации агротехнологий к современным климатическим тенденциям.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследований выступали административные районы Центральной и Западной почвенно-климатических зон Оренбургской области, приуроченные к Заволжской степной провинции и принимающие активное участие в формировании областного урожая озимой пшеницы.

Заволжская степная провинция занимает практически всю расположенную южнее Предуральской лесостепной провинции территорию Оренбургского Предуралья, за исключением самых южных, граничащих с Республикой Казахстан, окраин Ташлинского, Илекского, Соль-Илецкого и Акбулакского районов, входящих в Заволжскую сухостепную провинцию. Почвенный покров представлен чернозёмами обыкновенными и южными [16; 17].

Предметом исследований служили результаты хозяйственной деятельности и метеорологические условия за истекший 32-х летний период (1990–2021 гг.). В качестве метеорологической информации использовали данные метеорологических станций Росгидромета [18], а в качестве информации об

объёмах производства озимой пшеницы – данные Единой межведомственной информационно-статистической системы России [2] и сведения Министерства сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности Оренбургской области.

Метеорологические условия исследуемых территорий (1990–2021 гг.) оценивались по количеству выпавших атмосферных осадков (мм), температуре воздуха (°C), сумме активных (более 10°C) температур и гидротермическому коэффициенту (ГТК) Селянинова [19]. Их определение осуществлялось как в целом за год, так и за его части (период со среднесуточной температурой воздуха выше 10°C или период активных температур и холодный период года), а также периоды, приуроченные к вегетации озимой пшеницы. Отдельно выделяли предшествующий посеву период парования (с мая по август), период осенней (с августа по октябрь) и весенне-летней (с апреля по июнь) вегетации. Оценка засушливости климата осуществлялась на основе гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК). При значениях ГТК от 1,3 до 1,0 условия увлажнения считали слабо-засушливыми, от 1,0 до 0,7 – засушливыми, от 0,7 до 0,4 – очень засушливыми и ниже 0,4 – сухими.

Математическая обработка анализируемых данных проводилась стандартными статистическими методами корреляционного и регрессионного анализа [20] в *Microsoft Office Excel*. Для оценки силы связи между данными отдельных массивов, имеющими нормальное распределение, использовали коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ). При его значениях от 0,1 до 0,3 корреляционную зависимость считали слабой, от 0,3 до 0,7 – средней и больше 0,7 – сильной [21]. Для более точной оценки силы корреляционной связи пользовались интерпретацией абсолютных значений  $r$  по Чеддоку [22]. Выявление совместной вариации результативных и факторных признаков проводилось путём попарного сравнения временных рядов площадей посева (га), площадей уборки (га), валового сбора зерна (т), урожайности с посевной площади (т/га), урожайности с уборочной площади (т/га) с гидротермическими условиями различных периодов вегетации озимой пшеницы. К ним относили суммы активных температур воздуха (°C), осадков (мм) и ГТК Селянинова за периоды: предпосевной (период парования) – с мая по август года посева; осенней вегетации – с августа по октябрь года посева; весенне-летней вегетации – с апреля по июнь года уборки; периода от начала парования до уборки – с мая года посева по июнь года уборки и периода от посева до уборки – с августа года посева по июнь года уборки. Дополнительно определяли связь результативных признаков с осадками месяца посева (август); осадками холодного периода (периода со среднесуточной температурой воздуха ниже 10°C); осадками всего периода вегетации – с августа года посева по июнь года уборки, включая осадки холодного периода. В совокупности на наличие связей проведено сравнение 248 пар результативных и факторных признаков, представленных 14–32-х летними временными рядами.

#### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате перекрёстного определения связи структурных элементов урожая озимой пшеницы между

собой и с гидротермическими условиями периодов вегетации выявлено шесть совместных вариаций временных рядов результативных (валовой сбор зерна) и факторных признаков с теснотой корреляционной связи выше слабой, с абсолютными значениями коэффициента корреляции Пирсона ( $r$ ) более 0,3.

С площадью уборки и урожайностью с посевной и уборочной площади связь валовых урожаев прямая сильная высокая ( $r$  от 0,74 до 0,79), наиболее тесная с уборочной площадью. С площадью посева, суммой активных температур воздуха и суммой осадков (включая холодную часть года) периодов вегетации (от

даты посева до даты уборки) выявлена средняя умеренная связь ( $r$  от 0,33 до 0,48), причём с суммой активных температур связь обратная.

На основе парных коэффициентов корреляции приведённых признаков получено уравнение множественной регрессии с долей дисперсии зависимой переменной ( $Y$ ) от объясняющих переменных ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  и  $X_6$ ) достаточно хорошего уровня 93,0% ( $R^2 = 0,93$ ), в натуральной форме имеющее вид:

$$Y = 0,0658x_1 + 1,5754x_2 + 59,5264x_3 + 19184,7368x_4 - 3,5570x_5 - 8,7599x_6 - 18377,3041,$$

где:  $Y$  — валовой сбор зерна озимой пшеницы, т

$x_1$  — площадь посева, га

$x_2$  — площадь уборки, га

$x_3$  — урожайность с посевной площади, т/га

$x_4$  — урожайность с уборочной площади, т/га

$x_5$  — сумма активных температур воздуха от даты посева до даты уборки, °C

$x_6$  — сумма осадков (включая холодный период года) от даты посева до даты уборки, мм

Стандартизованная форма данного уравнения в виде:

$$t_y = 0,7660E - 01t_{x_1} + 0,6020t_{x_2} + 0,1830E - 02t_{x_3} + 0,5541t_{x_4} - 0,2486E - 01t_{x_5} - 0,2831E - 01t_{x_6}$$

указывает на преимущественное прямое влияние на валовой сбор зерна размера убранной площади (коэффициент  $\beta_2 = 0,6020$ ) и её урожайности (коэффициент  $\beta_4 = 0,5541$ ), а влияние других переменных заметно ниже.

Как известно, стратегия природосберегающего степного землепользования, активно развиваемая Институтом степи УрО РАН и основывающаяся на оптимальном соотношении различных ландшафтов в структуре земельного фонда, предусматривает переход на интенсивные технологии в растениеводстве и вывод из обработки нарушенных и неустойчивых низкопродуктивных земель [23]. Сохранение стабильных валовых сборов растительного сырья, прежде всего продовольственного назначения (зерно), предполагается за счёт существенного повышения урожайности на остающихся в обработке высокоплодородных полях [24].

В этом отношении представляется целесообразным выявление связей урожайности зерна с

уборочной площади, как фактора интенсификации растениеводства, с различными факторами внешней среды и прежде всего с метеорологическими параметрами — температурой воздуха и атмосферными осадками. В условиях современных климатических тенденций научный поиск в указанном направлении может иметь важное практическое значение для разработки эффективных и своевременных стратегий адаптации.

Как показали наши исследования, из четырёх парных сравнений временных рядов урожайности озимой пшеницы с убранной площади с температурными факторными признаками выделено 2 совместных вариации со средней теснотой корреляционной связи, с абсолютными значениями коэффициента корреляции Пирсона ( $r$ ) от 0,52 до 0,64.

Полученное на основе парных коэффициентов корреляции уравнение множественной регрессии в натуральной форме имеет вид:

$$Y = 0,5868E - 03x_1 - 0,3103E - 02x_2 + 8,6551,$$

где:  $Y$  — урожайность зерна озимой пшеницы с убранной площади, т/га

$x_1$  — сумма активных температур воздуха в весенне-летнюю вегетацию, °C

$x_2$  — сумма активных температур воздуха от даты посева до даты уборки, °C

Стандартизованная форма данного уравнения в виде  $t_y = 0,1311t_{x_1} - 0,7510t_{x_2}$  свидетельствует о преимущественном обратном влиянии на урожайность зерна озимой пшеницы суммы активных температур воздуха за весь период вегетации, от посева до уборки (коэффициент  $\beta_2 = 0,7510$ ), а влияние

суммы активных температур только весенне-летнего периода (коэффициент  $\beta_1 = 0,1311$ ) имеет подчинённое значение.

Из восьми парных сравнений временных рядов урожайности зерна и количества атмосферных осадков в различные периоды вегетации озимой пшеницы выделено 6 совместных вариаций со средней теснотой корреляционной связи, с абсолютными значениями коэффициента корреляции Пирсона ( $r$ ) от 0,35 до 0,49, представленных в уравнении множественной регрессии следующего вида:

$$Y = 0,1579E - 02x_1 + 1,9755E - 05x_2 + 0,3296E - 02x_3 + 0,6877E - 02x_4 + 0,9350E - 03x_5 - 0,9977,$$



где:  $Y$  — урожайность зерна озимой пшеницы с убранный площади, т/га

$X_1$  — сумма осадков периода парования, мм

$X_2$  — сумма осадков активного периода осенней вегетации, мм

$X_3$  — сумма осадков активного периода от начала парования до уборки, мм

$$t_y = 0,1165t_{x_1} + 0,1145t_{x_2} - 0,2t_{x_3} + 0,3190t_{x_4} + 0,4519t_{x_5} - 0,1046t_{x_6}$$

указывает на преимущественное прямое влияние на урожайность зерна осадков холодного периода года (коэффициент  $\beta_4 = 0,4519$ ) и суммы осадков активного периода от начала парования до уборки (коэффициент  $\beta_3 = 0,3190$ ), а влияние сумм осадков за отдельные короткие периоды вегетации значительно ниже.

Таким образом, из большого числа метеорологических факторов на разных этапах формирования урожая озимой пшеницы наиболее существенное влияние на интенсификацию производства зерна, выражающуюся в изменении урожайности с единицы убранный площади, оказывают (в порядке убывания) сумма активных температур воздуха от даты посева до даты уборки ( $^{\circ}\text{C}$ ), сумма осадков холодного периода года (мм), сумма осадков активного периода от начала парования до уборки (мм) и сумма активных температур воздуха в весенне-летнюю вегетацию ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Как известно, эти же метеорологические параметры и определяют влагообеспеченность посевов — при чрезмерно высокой солнечной инсоляции происходят большие потери влаги на непродуктивное испарение с поверхности почвы, вызывая дефицит воды для растений. Аналогичная ситуация в агроценозах

$X_4$  — сумма осадков холодного периода, мм

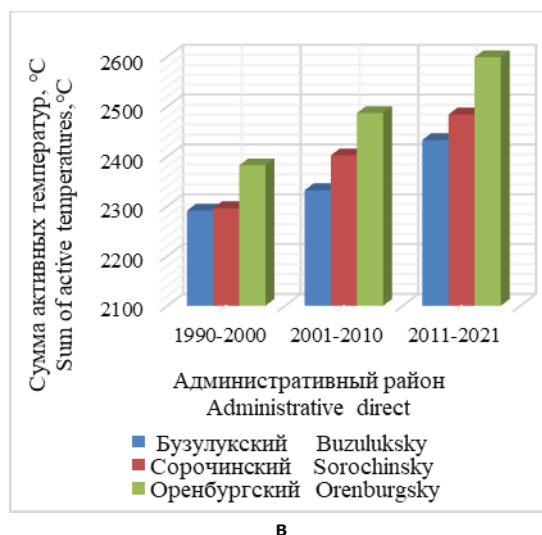
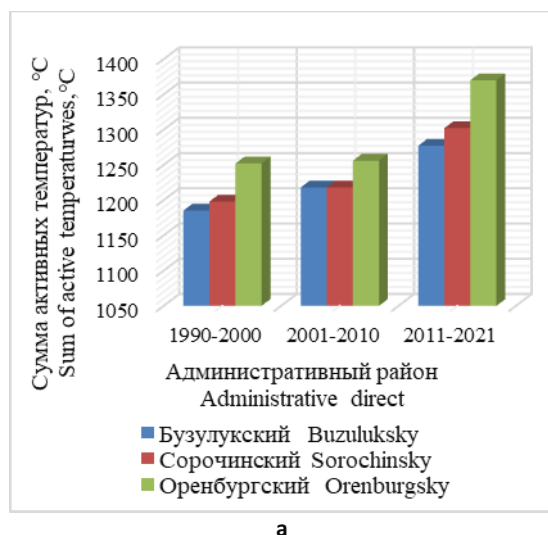
$X_5$  — сумма осадков от посева до уборки, включая осадки холодного периода, мм

Стандартизованная форма данного уравнения в виде:

складывается и при скудных атмосферных осадках или их длительном отсутствии в периоды наибольшей потребности растений [25].

В результате ретроспективного анализа гидротермических условий отдельных периодов вегетации озимой пшеницы на примере трёх районов Заволжской степной провинции выявлена динамика, определены современные параметры и направление снижения влагообеспеченности полевых культур в современных климатических реалиях.

Наибольший средний ресурс активных температур ( $1294^{\circ}\text{C}$ ) с коэффициентом вариации 13,9% за период весенне-летней вегетации озимой пшеницы отмечен в Центральной почвенно-климатической зоне (Оренбургский район), занимающей восточную часть Заволжской степной провинции. В расположенном в восточной части Западной природно-климатической зоны Сорочинском районе при той же вариативности сумма активных температур оказалась на  $53^{\circ}\text{C}$  ниже и ещё на  $13^{\circ}\text{C}$  ниже (при меньшей на 1 п.п. вариативности) в Бузулукском районе, расположенном на самых западных окраинах области (рис. 1а).



**Рисунок 1.** Динамика сумм активных температур воздуха за весенне-летний период вегетации озимой пшеницы (а) и за весь период от посева до уборки (б) в административных районах Заволжской степной природно-сельскохозяйственной провинции, Оренбургская область, 1990–2021 гг.

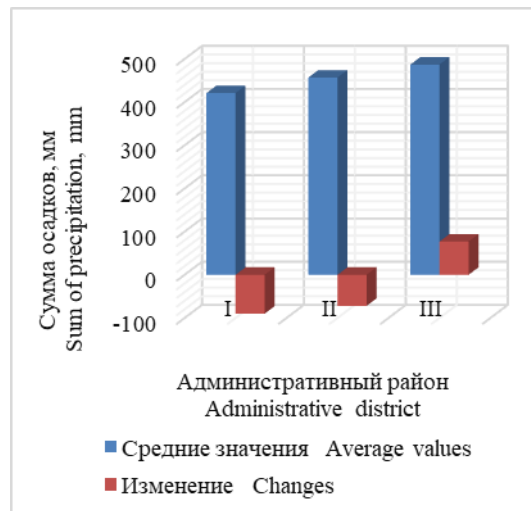
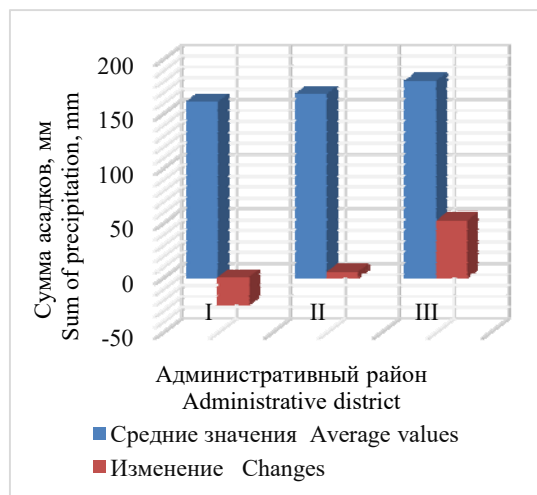
**Figure 1.** Dynamics of the sum of active air temperatures for the spring-summer growing season of winter wheat (a) and for the entire period from sowing to harvesting (b) in the administrative districts of the Trans-Volga steppe natural agricultural province, Orenburg region, 1990–2021

Установлено существенное изменение суммы активных температур в этот период, выразившееся в её увеличении за 32 года на  $185^{\circ}\text{C}$  (14,3%) в Центральной почвенно-климатической зоне (Оренбургский район) и на  $138^{\circ}\text{C}$  (11,1%) –  $90^{\circ}\text{C}$  (7,3%) в Западной (Сорочинский и Бузулукский районы соответственно).

Аналогичный, только более выраженный прирост термических ресурсов отмечен и за более длительный период — от посева до уборки, включая ещё и период парования (рис. 1б). В центральной части области он составил  $370^{\circ}\text{C}$  (14,8%) и  $268^{\circ}\text{C}$  (11,9%) –  $240^{\circ}\text{C}$  (10,2%) — в западной.

В отношении динамики атмосферных осадков за анализируемый период отмечены определённые географические особенности, выразившиеся в снижении их количества в одних территориях и увеличении в других. Так, количество осадков холодного периода года, в наибольшей степени определяющее урожайность зерна, в самой осадкоде-

фицитной Центральной почвенно-климатической зоне Заволжской степной провинции снизилось на 15,5%. В Сорочинском районе обозначился их незначительный тренд в сторону увеличения (на 2,9%), а в Бузулукском, самом осадкообеспеченном районе Западной природно-климатической зоны, существенный прирост – на 28,9% (рис. 2а).



**Рисунок 2.** Средние значения и изменение количества осадков холодного (а) и всего периода вегетации озимой пшеницы (включая период парования) (б) в административных районах Заволжской степной природно-сельскохозяйственной провинции за 1990–2021 гг. (I – Оренбургский, II – Сорочинский, III – Бузулукский), Оренбургская область

**Figure 2.** Average values and changes in the amount of precipitation of cold (a) and the entire growing season of winter wheat (including the fallow period) (b) in the administrative districts of the Trans-Volga steppe natural agricultural province for 1990–2021 (I – Orenburgsky, II – Sorochinsky, III – Buzuluksky), the Orenburg region

В отношении количества осадков всего периода вегетации озимой пшеницы, включая и период парования (рис. 2б), отмечены несколько иные особенности: отрицательный тренд выявлен не только в Центральной почвенно-климатической зоне (на 21,3%) но и на восточных окраинах Западной почвенно-климатической зоны (на 15,7%), в основном за счёт значительного сокращения осадков в тёплый период года (на 75 мм).

Результаты проведённого анализа гидротермических условий позволили выявить направленность уменьшения влагообеспеченности посевов и повышения засушливости климата, о чём убедительно свидетельствует и динамика ГТК по Селянинову. Его снижение за период активных температур при среднем значении в Центральной почвенно-климатической зоне 0,62 единицы, соответствующем очень засушливым условиям, составило 0,23 единицы (37,1%). В самых западных территориях области (Бузулукский район) при средних значениях ГТК 0,75 единиц (засушливые условия) снижение составило только 0,05 единиц или 6,7%.

В соответствии с этим для максимальной реализации биологического потенциала возделываемых сортов представляется целесообразной оптимизация пространственного размещения посевов с их преимущественной концентрацией в северо-западной части области и научное обоснование адаптивных технологических приёмов, увязанных с климатическими тенденциями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стабилизация производства зерна озимой пшеницы в богарном земледелии Оренбургской области нуждается в

научном обосновании и разработке перспективных направлений адаптации агротехнологий к повышающейся засушливости климата, значительно ухудшающей влагообеспеченность растений.

Развитие богарного земледелия без изъятия дополнительных поверхностных и подрусловых вод будет способствовать улучшению эколого-гидрологического режима реки Урал, ограничит смыв пестицидов и удобрений, снизит вероятность эрозионных процессов, будет способствовать восстановлению экосистем трансграничной реки.

В пределах Заволжской степной провинции повышению эффективности богарного земледелия могут способствовать технологические приёмы, направленные на сохранение жизнеспособности растений и почвенных влагозапасов в условиях нарастающих термических ресурсов и сокращения количества атмосферных осадков. К главным из них следует отнести посев засухоустойчивых и жаростойких сортов и максимальное сбережение, и рациональное расходование осадков холодного периода года путём посева кулис на паровых полях, снегозадержания, регулирования снеготаяния и снижение засорённости полей. Среди других влагосберегающих технологических приёмов, касающихся всего технологического цикла, включающего и подготовку паровых полей, перспективен переход к влагосберегающей минимальной обработке почвы с мульчированием поверхности поля или её полному исключению – технологиям нулевой обработки почвы, Mini-till, Strip-till, No-till, технологиям прямого посева, Twin-Row, технологиям разбросного поверхностного посева и др. Целесообразна уборка зерновых культур

очесывающими жатками с оставлением на поле практически не повреждённого стеблестоя (с выбранным зерном), выполняющего экологические функции, аналогичные естественным травяным сообществам.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в рамках НИР ОФИЦ УрО РАН (ИС УрО РАН) «Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем», № ГР АААА-А21-121011190016-1. Опубликовано при поддержке гранта РГО – Международная конференция «Трансграничные геоэкологические проблемы и вопросы природопользования в бассейне рек Внутренней Евразии в связи с изменением климата».

#### ACKNOWLEDGMENT

The research was conducted in the frame of SRW OFRC UB RAS (the Institute of Steppe UB RAS) "Problems of steppe nature management in condition of modern challenges: optimization of the interaction between natural and socio-economical systems", № ГР АААА-А21-121011190016-1. Published with the support of a grant from the Russian Geographical Society – International Conference "Transboundary Geoecological problems and Environmental Management issues in the basin of the rivers of Inner Eurasia in connection with climate change".

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.Ерохин В.Л. Мировое производство и торговля основными видами зерновых // Маркетинг и логистика. 2020. N 4 (30). URL: <https://marklog.ru/mirovoe-proizvodstvo-i-torgovlja-osnovnymi-vidami-zernovykh/> (дата обращения: 16.03.2022)
- 2.ЕМИСС. Государственная статистика / Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчёте на убранную площадь). URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31533> (дата обращения: 05.01.2022)
- 3.Гулянов Ю.А. Адаптация приёмов возделывания озимой пшеницы к климатическим особенностям // Земледелие. 2004. N 4. С. 28–29.
- 4.Пакшина С.М., Торилов В.Е., Мельникова О.М., Колыхалина А.Е., Осипов А.А. Урожайность озимой пшеницы и зависимость её от транспирации при дефиците почвенной влаги и элементов питания // Проблемы агрохимии и экологии. 2015. N 4. С. 27–33.
- 5.Алабушев А.В., Янковский Н.Г., Овсянникова Г.В., Попов А.С., Сухарев А.А. Расход влаги при возделывании озимой пшеницы по различным предшественникам в южной зоне Ростовской области // Аграрная Наука Евро-Северо-Востока. 2015. N 5 (48). С. 4–9.
- 6.Barnabas B., Jaeger K., Feher F. The effect of drought and heat stress on reproductive Processes in cereals // Plant Cell Environ. 2008. V. 31. P. 11–38. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x
- 7.Rashid M.A., Andersen M.N., Wollenweber B., Zhang X., Olesen J.E. Acclimation to higher VPD and temperature minimized negative effects on assimilation and grain yield of wheat // Agricultural and Forest Meteorology. 2018. V. 248. P. 119–129. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.09.018
- 8.Trnka N., Rotter R.P., Ruiz-Ramos M., Kersebaum K.C., Olesen J.E., Zalud Z., Semenov M.A. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change // Nature Climate Change. 2014. V. 4. P. 637–643. DOI: 10.1038/NCLIMAT2242
- 9.Harkness C., Semenov M.A., Areal F., Senapati N., Trnka M., Balek J., Bishop J. Adverse weather conditions for UK wheat production under climate change // Agricultural and Forest Meteorology. 2020. V. 282–283. P. 107862. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107862

- 10.Ионова Е.В., Иванисов М.М. Морозостойкость озимой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2014. N 4. С. 36–40.
- 11.Сухоруков А.Ф., Сухоруков А.А. Селекция озимой пшеницы на засухоустойчивость в Среднем Поволжье // Аграрная наука. 2017. N 5. С. 15–18.
- 12.Alghabari F., Lukas M., Jones H.E., Gooding M.J. Effect of Rht Alleles on the Tolerance of Wheat Grain Set to High Temperature and Drought Stress During Booting and Anthesis // Journal of Agronomy and Crop Science. 2014. V. 200. N 1. P. 36–45. DOI: 10.1111/jac.12038
- 13.Asseng S., Martre P., Maorano A., Rotter R.P., O'leary G.J., Fitzgerald G.J., Girousse C., Motzo R., Giunta F., Babar M.A. Climate change impact and adaptation for wheat protein // Global Change Biology. 2019. V. 25. N 1. P. 155–173. DOI: 10.1111/gcb.14481
- 14.Nasehzadeh M., Ellis R.H. Wheat seed weight and quality differ temporally in sensitivity to warm or cool conditions during seed development and maturation // Annals of Botany. 2017. V. 120. P. 479–493. DOI: 10.1093/aob/mcx074
- 15.Savill G.P., Michalski A., Powers S.J., Wan Y., Tosi P., Buchner P., Hawkesford M.J. Temperature and nitrogen supply interact to determine protein distribution gradients in the wheat grain endosperm // Journal of Experimental Botany. 2018. V. 69. P. 3117–3126. DOI: 10.1093/jxb/ery127
- 16.Блохин Е.В. Экология почв Оренбургской области. Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 1997. 229 с.
- 17.Климентьев А.И. Почвы степного Зауралья: ландшафтно-генетическая и экологическая оценка. Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 2000. 433 с.
- 18.Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения: 16.03.2022)
- 19.Журина Л.Л., Лосев А.П. Агрометеорология. СПб.: ООО «Квадро», 2012. 366 с.
- 20.Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- 21.Pearson K. Note on regression and inheritance in the case of two parents // Proceedings of the Royal Society of London. V. 58. N 347–352. P. 240–242. URL: [https://www.scopus.com/record-display.uri?eid=2s2.01942429034&origin=inward&tx-Gid=01a7778089314d187ce6c4c-130241e7e](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2s2.01942429034&origin=inward&tx-Gid=01a7778089314d187ce6c4c-130241e7e) (дата обращения: 12.02.2022)
- 22.Chaddock R.E. Principles and Methods of Statistics. Houghton Mifflin, 1925. URL: [https://books.google.ru/books/about/Principles\\_and\\_methods\\_of\\_statistics.html?id=&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Principles_and_methods_of_statistics.html?id=&redir_esc=y) (дата обращения: 16.03.2022).
- 23.Чибилёв А.А. Возобновляемые стратегические природные ресурсы устойчивого развития регионов степной зоны РФ // Успехи современного естествознания. 2016. N 3. С. 214–219.
- 24.Гулянов Ю.А., Чибилёв (мл.) А.А., Чибилёв А.А., Левыкин С.В. Проблемы адаптации степного землепользования к антропогенным и климатическим изменениям (на примере Оренбургской области) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. T. 86. N 1. С. 28–40.
- 25.Гулянов Ю.А. Возможности интеллектуальных цифровых технологий в экологизации ландшафтно-адаптивного земледелия степной зоны // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. N 4 (78). С. 8–11.

#### REFERENCES

- 1.Erokhin V.L. World production and trade in major cereals. Marketing i logistika [Marketing and logistics]. 2020, no. 4 (30). Available at: <https://marklog.ru/mirovoe-proizvodstvo-i-torgovlja-osnovnymi-vidami-zernovykh/> (accessed 16.03.2022) (In Russian)
2. EMISS. Gosudarstvennaya statistika / Urozhainost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur (v raschete na ubrannuyu ploshchad') [EMISS. State statistics/ Crop yield (per harvested



area]]. Available at:

<http://https://www.fedstat.ru/indicator/31533> (accessed 05.01.2022)

3. Gulyanov Yu.A. Adaptation of methods of cultivation of winter wheat to climatic features. *Zemledelie [Agriculture]*. 2004, no. 4, pp. 28–29. (In Russian)
4. Pakshina S.M., Torikov V.E., Mel'nikova O.M., Koly'xalina A.E., Osipov A.A. Dependence of winter wheat yield on transpiration with deficit of soil moisture and nutrients. *Problemy agrokhimii i ekologii [Problems of agrochemistry and ecology]*. 2015, no. 4, pp. 27–33. (In Russian)
5. Alabushev A.V., Yankovskiy N.G., Ovsyannikova G.V., Popov A.S., Sukharev A.A. The consumption of moisture at cultivation of winter wheat on different predecessors in the southern zone of the Rostov Region. *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka [Agricultural Science Euro-Northeast]*. 2015, no. 5 (48), pp. 4–9. (In Russian)
6. Barnabas B., Jaeger K., Feher F. The effect of drought and heat stress on reproductive Processes in cereals. *Plant Cell Environ*, 2008, vol. 31, pp. 11–38. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x
7. Rashid M.A., Andersen M.N., Wollenweber B., Zhang X., Olesen J.E. Acclimation to higher VPD and temperature minimized negative effects on assimilation and grain yield of wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 248, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.09.018
8. Trnka N., Rotter R.P., Ruiz-Ramos M., Kersebaum K.C., Olesen J.E., Zalud Z., Semenov M.A. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, pp. 637–643. DOI: 10.1038/NCLIMAT2242
9. Harkness C., Semenov M.A., Areal F., Senapati N., Trnka M., Bialek J., Bishop J. Adverse weather conditions for UK wheat production under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, vol. 282–283, pp. 107862. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107862
10. Ionova E.V., Ivanisov M.M. Frost resistance of winter-type wheat. *Zernovoe khozyaystvo Rossii [Grain economy of Russia]*. 2014, no. 4, pp. 36–40. (In Russian)
11. Suxorukov A.F., Sukhorukov A.A. Selection of winter wheat for drought tolerance in the Middle Volga Region. *Agrarnaya Nauka [Agricultural science]*. 2017, no. 5, pp. 15–18. (In Russian)
12. Alghabari F., Lukas M., Jones H.E., Gooding M.J. Effect of Rht Alleles on the Tolerance of Wheat Grain Set to High Temperature and Drought Stress During Booting and Anthesis. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2014, vol. 200, no. 1. pp. 36–45. DOI: 10.1111/jac.12038
13. Asseng S., Martre P., Maïorano A., Rotter R.P., O'Leary G.J., Fitzgerald G.J., Girousse C., Motzo R., Giunta F., Babar M.A. Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global Change Biology*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 155–173. DOI: 10.1111/gcb.14481

#### КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Юрий А. Гулянов и Александр А. Чибилев собрали материал, анализировали и интерпретировали результаты исследований, подготовили рукопись. Оба автора в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

14. Nasehzadeh M., Ellis R.H. Wheat seed weight and quality differ temporally in sensitivity to warm or cool conditions during seed development and maturation. *Annals of Botany*, 2017, vol. 120, pp. 479–493. DOI: 10.1093/aob/mcx074
15. Savill G.P., Michalski A., Powers S.J., Wan Y., Tosi P., Buchner P., Hawkesford M.J. Temperature and nitrogen supply interact to determine protein distribution gradients in the wheat grain endosperm. *Journal of Experimental Botany*, 2018, vol. 69, pp. 3117–3126. DOI: 10.1093/jxb/ery127
16. Blokhin E.V. *Ekologiya pochv Orenburgskoi oblasti [Soil ecology of the Orenburg region]*. Ekaterinburg, UrO RAS Publ., 1997, 229 p. (In Russian)
17. Klimentev A.I. *Pochvy stepnogo Zaural'ya: landshaftno-geneticheskaya i ekologicheskaya otsenka [Soils of the steppe Trans-Urals: landscape-genetic and ecological assessment]*. Ekaterinburg, UrO RAS Publ., 2000, 433 p. (In Russian)
18. *Spetsializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy [Specialized arrays for climate research]*. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (accessed 16.03.2022)
19. Zhurina L.L., Losev A.P. *Agrometeorologiya [Agrometeorology]*. St. Petersburg, Kladro Publ., 2012, 366 p. (In Russian)
20. Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Field experience methodology (with the basics of statistical processing of research results)]*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985, 351 p. (In Russian)
21. Pearson K. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 58, no. 347–352, pp. 240–242. Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0.1942429034&origin=inward&tx-Gid=01a7778089314d187ce6c4c-130241e7e> (accessed 12.02.2022)
22. Chaddock R.E. *Principles and Methods of Statistics*. Houghton Mifflin, 1925. Available at: [https://books.google.ru/books/about/Principles\\_and\\_methods\\_of\\_statistics.html?id=&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Principles_and_methods_of_statistics.html?id=&redir_esc=y) (accessed 16.03.2022)
23. Chibilyov A.A. Renewable strategic natural resources of sustainable development of regions of the steppe zone of the Russian Federation. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Successes of modern natural science]*. 2016, no. 3, pp. 214–219.
24. Gulyanov Yu.A., Chibilyov (Jr.) A.A., Chibilyov A.A., Levykin S.V. Problems of steppe land use adaptation to anthropogenic and climatic changes (case of Orenburg oblast). *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic series]*. 2022, vol. 86, no. 1, pp. 28–40.
25. Gulyanov Yu.A. Opportunities of intelligent digital technologies in the ecologization of landscape-adaptive crop farming in the steppe zone. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]*. 2019, no. 4 (78), pp. 8–11.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yuriy A. Gulyanov and Alexander A. Chibilev collected the data, analyzed and interpreted the results of the research, drafted the manuscript. Both authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

#### NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

#### ORCID

Юрий А. Гулянов / Yuriy A. Gulyanov <https://orcid.org/0000-0002-5883-349X>

Александр А. Чибилев / Alexander A. Chibilev <https://orcid.org/0000-0002-6214-1437>