

DOI 10.33952/2542-0720-2020-4-24-29-41

УДК 631/635:632.08:633.1

Гулянов Ю. А.

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ И ПЕРСПЕКТИВ РОСТА УРОЖАЙНОСТИ В ПОСТЦЕЛИННЫХ РЕГИОНАХ УРАЛА И ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН)

Реферат. *Определение биоклиматического потенциала земледельческих территорий необходимо для оценки полноты его использования и разработки высокоэффективных зональных ресурсосберегающих систем земледелия. Цель исследований заключалась в оценке современных биоклиматических ресурсов постцелинных регионов Урала и Западной Сибири, определении уровней климатически обеспеченной урожайности, выявлении лимитирующих факторов и резервов роста продуктивности полевых агроценозов. Объектом исследований выступали данные о температуре воздуха, уровне выпадения атмосферных осадков, дефиците влажности воздуха и урожайности зерновых культур за период с 1990 по 2019 г. в основных постцелинных территориях Оренбургской, Курганской, Омской областей и Алтайского края. Сравнительную оценку биологической продуктивности исследуемых территорий проводили по методике Д. И. Шашко в баллах относительно средней продуктивности. Установлено, что хозяйственная урожайность зерновых культур в анализируемых регионах сегодня значительно ниже потенциальной (расчётной по биоклиматическому потенциалу (БКП)). Даже при самой высокой урожайности зерна в Курганской и Омской областях на уровне 1,36–1,75 т/га эффективность использования БКП составляет только 27–38 %. Основным лимитирующим урожайность климатическим фактором являются атмосферные осадки, ограниченный ресурс которых на фоне растущих сумм эффективных температур сопровождается ростом дефицитов влажности воздуха. Проведённые исследования позволили заключить, что при высокоэффективном использовании биоклиматических ресурсов в постцелинных регионах Урала и Западной Сибири в условиях современных природных и антропогенных изменений окружающей среды возможно значительное (в 2,0–2,5 раза) повышение урожайности зерновых культур относительно получаемого в производстве уровня. В качестве приоритетов при разработке адаптивных технологических схем наряду с тщательным соблюдением технологической дисциплины следует рассматривать направленные на более полное сохранение атмосферных осадков и эффективное расходование почвенной влаги технологические приёмы.*

Ключевые слова: *постцелинные регионы, агроклиматические ресурсы, климатически обеспеченная урожайность, лимитирующие факторы, резервы роста.*

Введение

Определение биоклиматического потенциала территории возделывания сельскохозяйственных культур и оценку полноты его использования широко применяют при разработке зональных ресурсосберегающих систем земледелия.

По убеждению отечественных и зарубежных учёных, именно климатические факторы, важнейшими из которых являются условия влагообеспеченности и тепловой режим почвы и воздуха, определяют особенности земледельческих технологий. В их научных работах достаточно широко представлены результаты

исследований по выявлению зависимостей продуктивности зональных агроценозов от климатических факторов в различных территориях – регионах степной зоны РФ [1] и на равнинах Oltenia (Румыния) [2]. В Китае анализируют связь климатических условий с потребностями растений при выращивании продовольственных зерновых культур (пшеница, рис, кукуруза, соя) [3], а в Калифорнии (США) – при оценке влияния условий влагообеспеченности на растительное биоразнообразие [4]. Обосновывается необходимость разработки мероприятий, направленных на более полное и эффективное использование биоклиматических ресурсов в агротехнологиях Кулундинской равнины Алтайского края [5], земледельческой зоны Европейской части РФ [6], Южной Азии [7], Швейцарии [8], степных регионов России [9, 10]. В то же время, в большинстве природно-климатических зон РФ влияние климатических факторов на величину и качество урожая остаётся существенным, что указывает на недостаточную изученность обозначенных проблем на региональных уровнях [11]. Аналогичная ситуация складывается и в постцелинных земледельческих регионах Урала и Западной Сибири, о чём свидетельствуют относительно невысокие по сравнению с другими регионами степного пояса России показатели урожайности и валовые сборы полевых культур [12, 13].

В связи с этим реализуемые в представленном исследовании задачи, касающиеся анализа современных биоклиматических ресурсов и оценки перспектив роста урожайности полевых агроценозов в постцелинных земледельческих регионах Урала и Западной Сибири, достаточно актуальны, а полученные результаты имеют высокое практическое значение.

Цель исследований – оценка современных биоклиматических ресурсов, определение уровней климатически обеспеченной урожайности, выявление лимитирующих факторов и резервов роста продуктивности полевых агроценозов.

Для выполнения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- изучить ресурсы тепло- и влагообеспеченности постцелинных земледельческих регионов Урала и Западной Сибири, проанализировать их динамику за предшествующий тридцатилетний период;
- составить современную гидротермическую характеристику исследуемых регионов по биоклиматическому потенциалу (БКП) территории;
- провести расчёт потенциальной (по БКП) урожайности зерновых культур и определить эффективность использования БКП в производстве по хозяйственной урожайности;
- определить связь потенциальной (по БКП) и хозяйственной урожайности зерновых культур с гидротермическими показателями территории, выявить лимитирующие урожайность климатические факторы;
- провести анализ полученных результатов и определить основные направления эффективного использования гидротермических ресурсов при земледельческом использовании территорий.

Материалы и методы исследований

Объектом исследований выступали сведения о температуре воздуха, уровне выпадения атмосферных осадков, дефиците влажности воздуха (среднесуточные, среднемесячные, среднегодовые) и урожайности зерновых культур за период с 1990 г. по 2019 г. в основных постцелинных территориях Оренбургской, Курганской, Омской областей и Алтайского края. Источником метеорологических сведений служили размещённые в свободном доступе специализированные массивы для климатических исследований Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [14]. Для анализа гидротермических условий природно-

климатических зон Оренбургской области использовали данные метеостанции Оренбург (Центральная зона, синоптический индекс (СИ) – 35121) и Соль-Илецк (Южная зона, СИ – 35120), Курганской области – Звериноголовская (Южная лесостепная зона, СИ – 28756), Омской области – Русская Поляна (Степная зона, СИ – 28895) и Алтайского края – Славгород (Западно-Кулундинская зона, СИ – 29915). В качестве источника данных об урожайности зерновых культур использовали официальную статистическую информацию Федеральной службы государственной статистики, представленную в Единой межведомственной информационно-статистической системе РФ (ЕМИСС) [12] и сборниках «Регионы России. Социально-экономические показатели» [13].

Влияние тепло- и влагообеспеченности на продуктивность растений учитывали с помощью биоклиматического потенциала (БКП), рассчитываемого по формуле:

$$\text{БКП} = K_{p (ky)} \cdot \sum t > 10 \text{ } ^\circ\text{C} / 1000 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где БКП – относительная величина биоклиматического потенциала;

$K_{p (ky)}$ – коэффициент роста по годовому атмосферному увлажнению (КУ);

$\sum t > 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ – сумма активных (более $10 \text{ } ^\circ\text{C}$) температур периода вегетации, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент годового атмосферного увлажнения (КУ) определяли путём деления годового количества осадков ($\sum P$, мм) на сумму среднесуточных дефицитов влажности воздуха ($\sum d$, гПа):

$$\text{КУ} = \sum P / (\sum d). \quad (2)$$

Для расчёта коэффициента роста ($K_{p (ky)}$), выражающего собой отношение урожайности при имеющейся влагообеспеченности к максимально возможной её величине при оптимальной влагообеспеченности, пользовались формулой:

$$K_{p (ky)} = \lg (20 \times \text{КУ}). \quad (3)$$

Сравнительную оценку биологической продуктивности исследуемых территорий проводили по методике Д. И. Шашко в баллах относительно средней продуктивности [11, 15]. Переход от БКП к баллам осуществляли исходя из условия, что средняя продуктивность зерновых культур в условиях дефицитного увлажнения соответствует значению БКП 1,9, которое приравнивали к 100 баллам [16], а балл БКП определяли умножением значения БКП на коэффициент пропорциональности 55 ($100 : 1,9$):

$$B_k = 55 \times \text{БКП}. \quad (4)$$

Оценку факторов роста и расчёт величин потенциальной урожайности зерновых культур ($\text{ПУ}_{\text{БКП}}$, т/га) вычисляли, условно принимая за эталон урожайность зерновых с биологическим потенциалом в богарных условиях 4,6 т/га, при КПД ФАР на уровне 2 % (15):

$$\text{ПУ}_{\text{БКП}} = \text{Ц}_6 \times B_k, \quad (5)$$

где Ц_6 – цена балла, т/га.

Цену балла (Ц_6) определяли по формуле:

$$\text{Ц}_6 = 0,10 + 0,8 \text{ КУ}(f), \quad (6)$$

где $\text{КУ}(f)$ – коэффициент увлажнения, в виде отношения годового количества осадков ($\sum P$) к испаряемости (f).

Статистический анализ экспериментальных данных проводили в Excel.

Результаты и их обсуждение

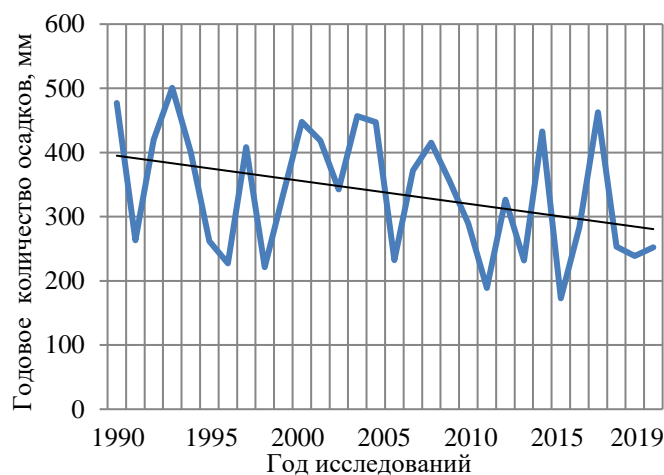
Оценка климата в сельскохозяйственных целях чаще всего предполагает анализ динамики выпадения осадков, термических и световых ресурсов, условий перезимовки растений, а также неблагоприятных для сельскохозяйственного производства гидротермических явлений [17–19].

В результате проведённых нами наблюдений установлено, что за анализируемый тридцатилетний промежуток времени (1990–2019 гг.) по количеству выпадающих атмосферных осадков практически во всех исследуемых территориях

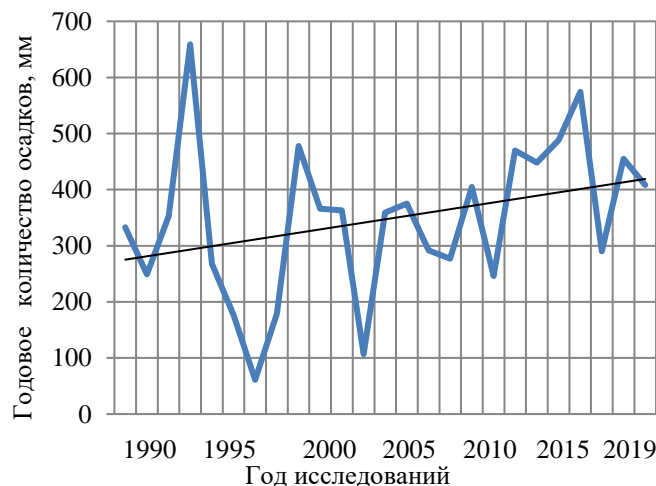
наметилась заметная динамика. Как и следовало ожидать, в связи с глобальным потеплением климата и повышением его засушливости в большинстве регионов их годовое количество сократилось – в Южной и Центральной природно-климатических зонах Оренбургской области, а также Западно-Кулундинской зоне Алтайского края.

При этом в отдельных регионах, при значительной вариации осадков в различные годы, их среднегодовое количество за анализируемый период осталось прежним (Степная зона Омской области) или даже выросло (Южная лесостепная зона Курганской области) (рисунок 1).

Так, самое значительное снижение количества осадков отмечено в Южной природно-климатической зоне Оренбургской области (рисунок 1 А). За последнее десятилетие (2010–2019 гг.) здесь выпало осадков на 93 мм (24,6 %) меньше, чем в предыдущее (2000–2009 гг.) и на 70 мм (19,7 %) меньше, чем в среднем за 1990–1999 гг. Следует отметить, что на указанной территории выявлена значительная степень варьирования осадков в различные годы. При коэффициенте вариации 29,0 % их количество изменялось от 500 мм в 1993 г., до 189 – в острозасушливом 2010 г.



А



Б

Рисунок 1 – Динамика годового количества осадков в Южной природно-климатической зоне Оренбургской области (А) и Южной лесостепной зоне Курганской области (Б) (1990–2019 гг.)

В Центральной зоне Оренбургской области при общей тенденции повышения засушливости климата сокращение количества атмосферных осадков оказалось менее выраженным. Так, за период с 2010 по 2019 г. в среднем за год выпало 336 мм осадков, что оказалось ниже, чем в предыдущее десятилетие на 53 мм (13,6 %) и на 22 мм (6,1 %) ниже, чем за период с 1990 по 1999 г.

В Западно-Кулундинской природно-климатической зоне Алтайского края, при меньшем, чем в Оренбуржье, годовом количестве атмосферных осадков, их динамика за анализируемый промежуток времени оказалась ещё менее выраженной. Их снижение в последнее десятилетие (2010–2019 гг.) по сравнению с предыдущим (2000–2009 гг.) составило только 24 мм (7,6 %) и 9 мм (2,9 %) – по сравнению с периодом 1990–1999 гг.

В наиболее благоприятной по количеству годовых атмосферных осадков Степной природно-климатической зоне Омской области (369 мм в год) за анализируемый тридцатилетний период времени выявлен их нулевой среднесуточный тренд. В данном регионе отмечается самая незначительная вариация годовых осадков, составляющая только 18 %.

В Южной лесостепной зоне Курганской области, где за анализируемый период времени в среднем за год фиксировали 341 мм атмосферных осадков, выявлена устойчивая тенденция к их росту (рисунок 1 Б) при самой низкой стабильности в отдельные годы. Так, в среднем за 2010–2019 гг. в указанной зоне выпало 406 мм осадков, что оказалось на 72 мм (21,5 %) выше, чем за предыдущее десятилетие (334 мм) и на 121 мм (42,4 %) – по сравнению с периодом 1990–1999 гг.

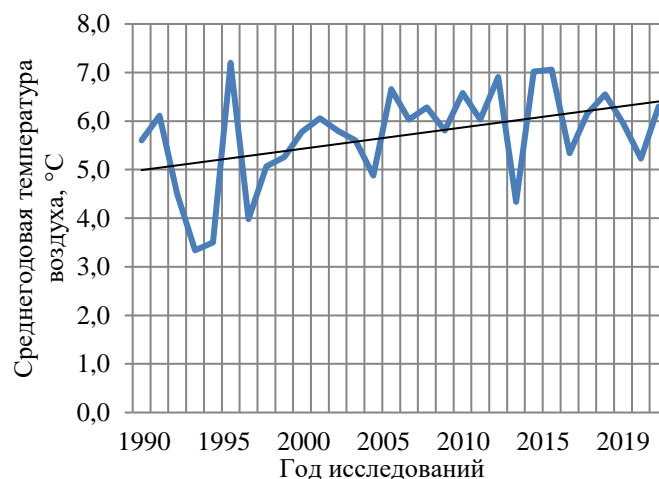
Анализ среднесуточных и среднегодовых температур воздуха позволил оценить термические ресурсы исследуемых территорий и выявить их динамику. Общим для всех регионов стало сохранение (Западно-Кулундинская зона Алтайского края) или повышение среднегодовой температуры, составившее 0,2 °С (Степная зона Омской и Южная лесостепная зона Курганской областей) – 1,3 °С (Южная и Центральная зоны Оренбургской области) (рисунок 2).

Заключая анализ термических ресурсов анализируемых территорий и условий увлажнения по количеству выпадающих атмосферных осадков, следует подчеркнуть, что при общей мировой тенденции потепления и нарастающей засушливости климата, в разрезе исследуемых постцелинных регионов Урала и Западной Сибири выявлены отдельные особенности. Так, в Степной природно-климатической зоне Омской области за последние тридцать лет (1999–2019 гг.) отмечается самое стабильное по годам количество атмосферных осадков при незначительном (на 0,2 °С) повышении среднегодовой температуры воздуха. Относительно стабильными остаются указанные метеорологические параметры и в Западно-Кулундинской зоне Алтайского края – при сохранявшейся стабильной среднегодовой температуре воздуха (3,0 °С) количество атмосферных осадков снизилось только на 20 мм. Напротив, значительное снижение количества атмосферных осадков при устойчивом нарастании среднегодовых температур (на 1,3 °С) отмечали в Южной и Центральной зонах Оренбургской области. А в Южной лесостепной зоне Курганской области при достаточно стабильной годовой температуре (+0,2 °С) наблюдали их значительный рост.

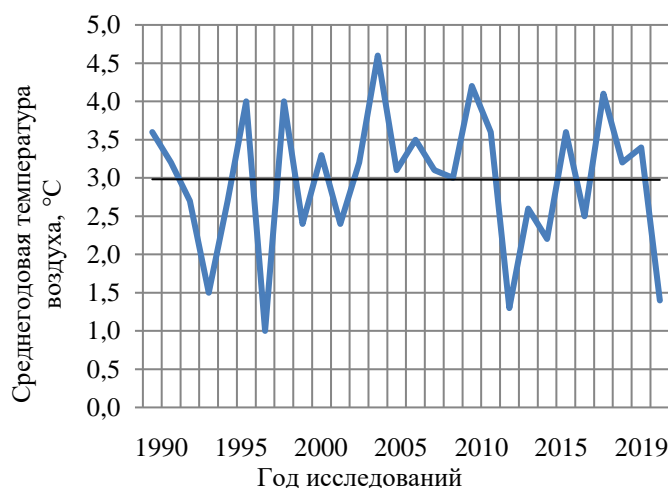
Отмеченные особенности в динамике выпадения атмосферных осадков и температурном режиме воздуха в свою очередь оказали заметное влияние на другие гидротермические показатели климата (таблица 1).

Так, сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха на протяжении всего периода исследований наибольших значений достигала в Центральной и Южной природно-климатических зонах Оренбургской области. В Западно-

Кулундинской зоне Алтайского края аналогичный показатель оказался ниже на 585–786 гПа или в 1,43–1,58 раза. Ещё меньшие значения указанного параметра из всех анализируемых территорий отмечены в Южной лесостепной зоне Курганской области, а самые влажные и прохладные условия в среднем за тридцать лет сложились в Степной зоне Омской области – здесь сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха составила только 1096 гПа.



А



Б

Рисунок 2 – Динамика среднегодовой температуры воздуха в южной природно-климатической зоне Оренбургской области (А) и Западно-Кулундинской зоне Алтайского края (Б) (1990–2019 гг.)

Аналогично распределению по природно-климатическим зонам постцелинных регионов Урала и Западной Сибири сумм дефицитов влажности воздуха, их зависимости от термических условий и количества атмосферных осадков, распределились коэффициенты годового атмосферного увлажнения и коэффициенты роста.

Наибольших значений они достигали в регионах с наименьшим дефицитом атмосферного увлажнения, ставшего следствием более значительного годового количества атмосферных осадков при не самой высокой среднегодовой температуре воздуха.

Таблица 1 – Гидротермическая характеристика сельскохозяйственных постцелинных регионов Урала и Западной Сибири

Регион / Природно- климатическая зона	Период	Сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха, гПа	Коэффициент годового атмосферного увлажнения	Коэффициент роста по годовому атмосферному увлажнению	Биоклиматический потенциал территории (БКП)
Оренбургская область / Центральная	1990–1999	1988	0,18	0,55	1,55
	2000–2009	1945	0,20	0,60	1,74
	2010–2019	1866	0,18	0,55	1,69
	среднее	1933	0,19	0,57	1,66
Оренбургская область / Южная	1990–1999	1966	0,18	0,55	1,57
	2000–2009	1855	0,20	0,60	1,75
	2010–2019	2581	0,11	0,34	1,06
	среднее	2134	0,16	0,50	1,46
Курганская область / Южная лесостепь	1990–1999	1096	0,26	0,71	1,76
	2000–2009	1077	0,31	0,79	1,98
	2010–2019	1561	0,26	0,71	2,10
	среднее	1245	0,28	0,74	1,95
Омская область / Степная	1990–1999	1050	0,34	0,83	1,92
	2000–2009	1157	0,33	0,82	1,91
	2010–2019	1082	0,34	0,83	1,93
	среднее	1096	0,34	0,83	1,92
Алтайский край / Западно- Кулундинская	1990–1999	1262	0,24	0,68	1,79
	2000–2009	1382	0,23	0,66	1,74
	2010–2019	1400	0,21	0,62	1,64
	среднее	1348	0,23	0,65	1,72

В результате самый высокий биоклиматический потенциал (БКП), составивший в среднем за тридцатилетний период 1,95 единиц, отмечен в Южной лесостепной зоне Курганской области, причём от десятилетия к десятилетию он устойчиво повышался на 0,12–0,22 единицы, достигнув максимальных значений в последнее десятилетие – 2,1.

Близкий к указанным значениям БКП отмечен в Степной природно-климатической зоне Омской области, причём его динамика в разрезе десятилетий оказалась самой незначительной среди всех регионов. Оставшиеся регионы в порядке убывания БКП расположились следующим образом: Западно-Кулундинская зона Алтайского края – Центральная и Южная зоны Оренбургской области. Следует подчеркнуть, что в Западно-Кулундинской зоне Алтайского края и Южной Зоне Оренбургской области наметилась тенденция к снижению БКП, отчётливо прослеживаемая по ходу анализируемых десятилетий.

Следствием описанных особенностей гидротермических характеристик в постцелинных регионах Урала и Западной Сибири стала вариация балльной оценки климата и потенциальной (расчётной по БКП) урожайности зерновых культур за анализируемый период (1990–2019 гг.). Как следует из представленных в таблице 2 сведений, наибольшая потенциальная (расчётная по БКП) урожайность зерновых культур в последнее десятилетие (2010–2019 гг.) отмечена в Степной природно-климатической зоне Омской области (4,56 т/га) и Южной лесостепной зоне Курганской области (5,06 т/га). Наибольших значений в указанных территориях она достигала и в предшествующие десятилетия.

Как показали наши расчёты, по гидротермическим характеристикам Западно-Кулундинской зоны Алтайского края, Центральной и особенно Южной зон Оренбургской области, потенциальная (расчётная по БКП) урожайность зерновых культур здесь несколько ниже и может варьировать от 3,49 до 3,23–2,79 т/га.

Таблица 2 – Потенциальная (расчётная по БКП) урожайность зерновых культур для сельскохозяйственных постцелинных регионов Урала и Западной Сибири

Регион / Природно-климатическая зона	Период	Балл БКП	Расчётная цена балла, т/га	Потенциальная урожайность зерна, т/га	Производственная урожайность, т/га	Эффективность использования БКП, %
Оренбургская область / Центральная	1990–1999	85	0,035	2,98	1,03	35
	2000–2009	96	0,036	3,45	1,01	29
	2010–2019	93	0,035	3,26	1,04	32
	среднее	91	0,035	3,23	1,02	32
Оренбургская область / Южная	1990–1999	86	0,035	3,01	1,02	34
	2000–2009	96	0,036	3,45	1,03	30
	2010–2019	58	0,033	1,92	0,60	31
	среднее	80	0,035	2,79	0,88	31
Курганская область / Южная лесостепь	1990–1999	96	0,039	3,74	1,37	36
	2000–2009	109	0,042	4,58	1,38	30
	2010–2019	115	0,044	5,06	1,36	27
	среднее	106	0,042	4,46	1,37	31
Омская область / Степная	1990–1999	106	0,043	4,56	1,22	27
	2000–2009	105	0,043	4,52	1,53	34
	2010–2019	106	0,043	4,56	1,75	38
	среднее	106	0,043	4,54	1,50	33
Алтайский край / Западно-Кулундинская	1990–1999	98	0,038	3,72	0,95	26
	2000–2009	95	0,038	3,61	1,21	34
	2010–2019	90	0,035	3,15	1,12	37
	среднее	94	0,037	3,49	1,09	32

Как известно, потенциальная (расчётная по БКП) урожайность не всегда достаточно достоверно отражает уровень хозяйственной урожайности, но она позволяет оценить эффективность использования биоклиматических ресурсов территории и определить резервы роста урожайности при оптимизации условий выращивания полевых культур.

Как следует из представленных в таблице 2 сведений, хозяйственная урожайность зерновых культур в анализируемых регионах сегодня значительно ниже потенциальной (расчётной по БКП). Так, при наивысшей среди исследуемых регионов урожайности зерна в Курганской и Омской областях на уровне 1,36–1,75 т/га эффективность использования БКП составляет только 27–38 %. У других территорий при ещё меньшей хозяйственной урожайности зерна эффективность использования БКП также остаётся низкой – на уровне 31–32 %.

Таким образом, сравнение потенциальной (расчётной по БКП) урожайности зерновых культур и их хозяйственной урожайности в постцелинных регионах Урала и Западной Сибири в условиях современных климатических и антропогенных изменений указывает на далеко не исчерпанные резервы роста урожайности во всех территориях. Данное обстоятельство для степных регионов РФ сегодня становится особенно актуальным, поскольку широко пропагандируемая с целью сохранения биологического разнообразия и ключевых участков степей оптимизация структуры землепользования предполагает выведение из сельскохозяйственного оборота деградированных земель и выделение наиболее ценных в ландшафтном отношении местностей и урочищ. В этом случае при неизбежном сокращении сельскохозяйственных площадей для обеспечения продовольственной безопасности населения потребуется интенсификация земледелия на высокоплодородных землях с расчётом на более высокую урожайность [20, 21].

При разработке агротехнических мероприятий, направленных на более полное и эффективное использование биоклиматических ресурсов, представляется целесообразным установление связи урожайности сельскохозяйственных культур с климатическими особенностями территории и выявление лимитирующих урожайность климатических факторов. Как показали наши расчёты, наиболее сильно производственная урожайность зерновых культур в исследуемых регионах связана с суммой дефицитов влажности воздуха ($r = -0,80$) и суммой активных (выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур ($r = -0,74$). Её зависимость от сумм дефицитов влажности воздуха описывается уравнением регрессии $y = -1327,0x + 3110$ и $y = -737,4x + 3571$ – от сумм активных (выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур. В обоих случаях связь обратная, указывающая на снижение урожайности зерновых культур при повышении сумм дефицитов влажности воздуха и сумм активных (выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур, вариация которых детерминирует 64 % и 54 % вариации урожайности зерна соответственно (таблица 3).

С суммой осадков за период активной вегетации (период со среднесуточной температурой воздуха выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$), определяющих совместно с суммой активных (выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур воздуха сумму дефицитов его влажности и выступающих в роли главного лимитирующего урожайность климатического фактора, связь прямая, с коэффициентом корреляции 0,68. Указанная связь описывается уравнением регрессии: $y = 79,25x + 89,96$. Коэффициент детерминации ($r^2 = 0,46$) свидетельствует о зависимости урожайности зерновых культур от вариации осадков в указанный период в 46 % случаев.

Таблица 3 – Связь потенциальной (расчётной по БКП) и хозяйственной урожайности зерновых культур с гидротермическими показателями в земледельческих постцелинных регионах Урала и Западной Сибири (среднее за 1990–2019 гг.)

Гидротермический показатель	Статистический показатель	Потенциальная (расчётная по БКП) урожайность, т/га	Урожайность производственная, т/га
Сумма осадков за год	Коэффициент корреляции (r)	0,53	0,37
	Коэффициент детерминации (r^2)	0,28	0,13
	уравнение регрессии	$y = 24,98x + 250,4$	$y = 52,93x + 280,8$
Сумма осадков за период с температурой выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Коэффициент корреляции (r)	0,93	0,68
	Коэффициент детерминации (r^2)	0,86	0,46
	Уравнение регрессии	$y = 36,02x + 49,61$	$y = 79,25x + 89,96$
Сумма активных (выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур	Коэффициент корреляции (r)	-0,64	-0,74
	Коэффициент детерминации (r^2)	0,41	0,54
	Уравнение регрессии	$y = -207,2x + 3492$	$y = -737,4x + 3571$
Сумма дефицитов показателей влажности воздуха	Коэффициент корреляции (r)	-0,79	-0,80
	Коэффициент детерминации (r^2)	0,62	0,64
	Уравнение регрессии	$y = -442,4x + 3190$	$y = -1327,0x + 3110$

Связь производственной урожайности зерновых культур с годовым количеством осадков, описываемая уравнением регрессии $y = 52,93x + 280,8$, оказалась также прямой, хотя и менее выраженной. Их вариация определяет производственную урожайность зерновых культур в 13 % случаев.

Таким образом, проведённые исследования позволили установить, что постцелинные земледельческие регионы Урала и Западной Сибири в условиях современных климатических и антропогенных изменений располагают далеко не исчерпанным биоклиматическим потенциалом, эффективность которого составляет менее 40 %. Более эффективное использование климатических ресурсов может

обеспечить повышение урожайности зерновых культур на указанной территории до 3,5–4,5 т/га против 1,0–1,5 т/га, собранных в среднем за последние тридцать лет.

Основным лимитирующим потенциальную (расчётную по БКП) урожайность фактором выступают атмосферные осадки за период со среднесуточной температурой воздуха выше 10 °С ($r = 0,93$). В период активной вегетации полевых культур их ресурс составляет только 160–220 мм. На фоне отчётливой динамики повышения сумм эффективных температур ограниченный ресурс атмосферного увлажнения сопровождается ростом дефицитов влажности воздуха, что дополнительно снижает биоклиматический потенциал территории.

Выводы

Проведённые исследования позволили установить, что хозяйственная урожайность зерновых культур в постцелинных земледельческих регионах Урала и Западной Сибири сегодня значительно ниже потенциальной (расчётной по БКП). Даже в наиболее урожайных Курганской и Омской областях при урожайности 1,36–1,75 т/га эффективность использования БКП составляет только 27–38 %. В других регионах при ещё меньшей хозяйственной урожайности зерна эффективность использования БКП остаётся на уровне 31–32 %.

При высокоэффективном использовании биоклиматических ресурсов в постцелинных регионах Урала и Западной Сибири в условиях современных природных и антропогенных изменений окружающей среды возможно значительное (в 2,0–2,5 раза) повышение урожайности зерновых культур, относительно получаемого в производстве уровня.

В качестве приоритетов при разработке адаптивных технологических схем наряду с тщательным соблюдением технологической дисциплины следует рассматривать направленные на более полное сохранение атмосферных осадков и эффективное расходование почвенной влаги технологические приёмы.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00069).

Литература

1. Гулянов Ю. А. Стратегии новационного землепользования и роль природоподобных агротехнологий в экологической оптимизации степных ландшафтов // Сборник научных трудов Государственного Никитинского ботанического сада. 2019. Т. 148. С. 50–59.
2. Ontel I., Vladut A. Impact of drought on the productivity of agricultural crops within the Oltenia Plain, Romania // *Geographica Pannonica*. 2015. Vol. 19. No. 1. P. 6–19.
3. Zhao Ch., Liu B., Piao Sh., Wang X., Lobell D. B., Huang Y., Huang M., Yao Y., Bassu S., Ciais P., Durand J.-L., Elliott J., Ewert F., Janssens I. A., Li T., Lin E., Liu Q., Martre P., Müller Ch., Peng Sh., Peñuelas J., Ruane A. C., Wallach D., Wang T., Wu D., Liu Zh., Zhu Y., Zhu Z., Asseng S. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates // *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. No. 114(35). P. 9326–9331.
4. Harrison S., Spasojevic M. J., Li D. Climate and plant community diversity in space and time // *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2020. No. 117(9). P. 4464–4470.
5. Беляев В. И., Бондарович А. А., Понькина Е. В., Щербинин В. В., Шмидт Г., Мацора А. В., Кожанов Н. А., Рудев Н. В. Температурный режим воздуха и почвы по данным метеорологической и почвенно-гидрологической мониторинговой сети в Кулундинской равнине за вегетационные периоды 2013–2016 гг. // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2017. № 3(149). С. 30–37.
6. Pavlova V., Karachenkova A., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. No. 3. P. 034010. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf8be.
7. Jat H. S., Choudhary M., Datta A., Yadav A. K., Meena M. D., Devi R., Gathala M. K., Jat M. L., McDonald A., Sharma P. C. Temporal changes in soil microbial properties and nutrient dynamics under climate smart agriculture practices // *Soil and Tillage Research*. 2020. Vol. 199. P. 104595. DOI: 10.1016/j.still.2020.104595.

8. Sangines de Carcer P., Sinaj S., Santonja M., Fossati D., Jeangros B. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties // *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 190. P. 209–219.
9. Гулянов Ю. А., Чибилёв А. А. Экологизация степных агротехнологий в условиях природных и антропогенных изменений окружающей среды // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 3. С. 5–11.
10. Gulyanov Yu. A., Chibilev A. A., Levykin S. V., Silantieva M. M., Kazachkov G. V., Sokolova L. V. Ecological-based adaptation of agriculture to the soil and climatic conditions in Russian steppe // *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. No. 9(3). P. 393–398.
11. Гулянов Ю. А., Досов Д. Ж., Умарова С. А. Эффективность использования биоклиматических ресурсов при выращивании озимой пшеницы в Оренбуржье // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2010. № 2(26). С. 48–50.
12. ЕМИСС. Государственная статистика. Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчёте на убранную площадь). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fedstat.ru/indicator/31533> (дата обращения 27.08.2020).
13. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2019: Р32. Статистический сборник. М.: Росстат. 2019. 1204 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения 27.08.2020).
14. Атмосферные осадки и температура воздуха. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения 04.08.2020).
15. Шашко Д. И. Учитывать биоклиматический потенциал // *Земледелие*. 1985. № 4. С. 19–26.
16. Тихонов В. Е. Биоклиматический потенциал, его использование и устойчивость производства зерна на Южном Урале // *Материалы международной конференции по повышению устойчивости сельскохозяйственного производства «Наука – сельскому хозяйству»*. Оренбург: Издательство ФГБНУ «Оренбургский НИИСХ», 2000. С. 26–36.
17. Крючков А. Г. Температурный режим чернозёма южного под посевами яровой твёрдой пшеницы в засушливой степи // *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2015. № 3. С. 1–12.
18. Гулянов Ю. А. Возможности интеллектуальных цифровых технологий в экологизации ландшафтно-адаптивного земледелия степной зоны // *Известия Оренбургского ГАУ*. 2019. № 4(78). С. 8–11.
19. Лихенко И. Е., Советов В. В., Аносов С. И., Лихенко Н. Н. Формирование урожая зерна сибирских сортов яровой мягкой пшеницы в условиях континентального климата Западной Сибири // *Достижения науки и техники АПК*. 2014. № 1. С. 27–30.
20. Гулянов Ю. А. Мониторинг фитометрических параметров с использованием инновационных методов сканирования посевов // *Таврический вестник аграрной науки*. 2019. № 3(19). С. 64–76. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76.
21. Гулянов Ю. А., Чибилёв А. А., Чибилёв А. А. (мл.). Резервы повышения урожайности и качества зерна озимой пшеницы и их зависимость от гетерогенности посевов в условиях степной зоны Оренбургского Предуралья // *Юг России: экология, развитие*. 2020. Т. 15. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-79-88.

References

1. Gulyanov Yu. A. Strategies of innovative land-use and the role of natural-like agrotechnologies in the ecological optimization of steppe landscapes // *Works of the State Nikita Botanical Garden*. 2019. Vol. 148. P. 50–59.
2. Ontel I., Vladut A. Impact of drought on the productivity of agricultural crops within the Oltenia Plain, Romania // *Geographica Pannonica*. 2015. Vol. 19. No. 1. P. 6–19.
3. Zhao Ch., Liu B., Piao Sh., Wang X., Lobell D. B., Huang Y., Huang M., Yao Y., Bassu S., Ciais P., Durand J.-L., Elliott J., Ewert F., Janssens I. A., Li T., Lin E., Liu Q., Martre P., Müller Ch., Peng Sh., Peñuelas J., Ruane A. C., Wallach D., Wang T., Wu D., Liu Zh., Zhu Y., Zhu Z., Asseng S. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates // *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. No. 114(35). P. 9326–9331.
4. Harrison S., Spasojevic M. J., Li. D. Climate and plant community diversity in space and time // *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2020. No. 117(9). P. 4464–4470.
5. Belyaev V. I., Bondarovich A. A., Ponkina Ye. V., Shcherbinin V. V., Schmidt G., Matsyura A. V., Kozhanov N. A., Rudev N. V. Air and soil temperature regime according to meteorological and soil-hydrological monitoring network in the Kulunda Plain in the growing seasons of 2013–2016 // *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017. No. 3(149). P. 30–37.
6. Pavlova V., Karachenkova A., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. No. 3. P. 034010. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf8be.

7. Jat H. S., Choudhary M., Datta A., Yadav A. K., Meena M. D., Devi R., Gathala M. K., Jat M. L., McDonald A., Sharma P. C. Temporal changes in soil microbial properties and nutrient dynamics under climate smart agriculture practices // Soil and Tillage Research. 2020. Vol. 199. P. 104595. DOI: 10.1016/j.still.2020.104595.
8. Sangines de Carcer P., Sinaj S., Santonja M., Fossati D., Jeangros B. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties // Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 190. P. 209–219.
9. Gulyanov Yu. A., Chibilev A. A. Ecologization of steppe agrotechnologies in the conditions of natural and anthropogenic environmental changes // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 5–11.
10. Gulyanov Yu. A., Chibilev A. A., Levykin S. V., Silantieva M. M., Kazachkov G. V., Sokolova L. V. Ecological-based adaptation of agriculture to the soil and climatic conditions in Russian steppe // Ukrainian Journal of Ecology. 2019. No. 9(3). P. 393–398.
11. Gulyanov Yu. A., Dosov D. Zh., Umarova S. V. Efficiency of using bioclimatic resources in winter wheat cultivation in Orenburg Region // Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2010. No. 2(26). P. 48–50.
12. EMISS. State statistics. Crop yield (per harvested area). [Electronic resource]. Access point: <https://www.fedstat.ru/indicator/31533> (references date 27.08.2020).
13. Region of Russia. Socio-economic indicators. 2019: R 32 Statistical Book. Moscow: Rosstat, 2019. 1204 p. [Electronic resource]. Access point: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (reference's date 27.08.2020).
14. Precipitation and air temperature. [Electronic resource]. Access point: <http://aisori.m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (references date 04.08.2020).
15. Shashko D. I. To take into account the bioclimatic potential // Zemledeliye. 1985. No. 4. P. 19–26.
16. Tikhonov V. E. Bioclimatic potential, its use and sustainability of grain production in the southern Urals // Proceedings of the international conference on increasing the sustainability of agricultural production "From Science to Agriculture". Orenburg: Publishing house of the Orenburg Research Institute of Agriculture, 2000. P. 26–36.
17. Kryuchkov A. G. Temperature mode chernozem south sown hard spring wheat in arid steppe // Bulletin of the Orenburg scientific center of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences. 2015. No. 3. P. 1–12.
18. Gulyanov Yu. A. Opportunities of intelligent digital technologies in the ecologization of landscape-adaptive crop farming the steppe zone // Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2019. No. 4(78). P. 8–11.
19. Likhenko I. T., Sovetov V. V., Anosov S. I., Likhenko N. N. Siberian spring wheat varieties grain yield formation under continental climate of Western Siberia // Achievements of science and technology of AIC. 2014. No. 1. P. 27–30.
20. Gulyanov Yu. A. Monitoring of the phytometric indications using innovative crops scanning methods // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2019. No. 3(19). P. 64–76. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76.
21. Gulyanov Yu. A., Chibilyov A. A., Chibilyov A. A. (Jr.). Reserves for the increase of yield and quality of winter wheat grain and their dependence on the heterogeneity of crops in the conditions of the steppe zone of the Orenburg Urals, Russia // South of Russia: ecology, development. 2020. Vol. 15. No. 1. P. 79–88. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-79-88.

UDC 631/635:632.08:633.1

Gulyanov Yu. A.

ASSESSMENT OF MODERN BIOCLIMATIC RESOURCES AND PROSPECTS OF YIELD GROWTH IN THE POST-VIRGIN REGIONS OF THE URALS AND WESTERN SIBERIA

***Summary.** An assessment of the bioclimatic potential of agricultural territories is necessary to evaluate the utilization rate and the development of highly efficient zonal resource-saving farming systems. The purpose of the research was to assess the current level of the bioclimatic resources of the post-virgin regions of the Urals and Western Siberia to determine the levels of climatically provided yields, to identify the limiting factors and reserves of field agrocenoses productivity growth. Data on air temperature, precipitation level, air humidity deficit, and yield of grain crops (1990–2019) in the main post-virgin territories of the Orenburg, Kurgan, Omsk regions, and Altai Krai were the object of research. Comparative assessment of the biological productivity of the studied territories was carried out according to the method of D. I. Shashko in points in the context of average productivity. We established*

that the economic productivity of grain crops in the analyzed regions today was significantly lower than the potential one (calculated according to the bioclimatic potential (BCP)). Even if the grain yield in the Kurgan and Omsk regions is at the highest level (1.36–1.75 t/ha), the efficiency of BCP using is only 27–38 %. Precipitation is the main limiting climatic factor. Lack of precipitation against the background of growing amounts of effective temperatures is accompanied by an increase in air humidity deficits. The conducted studies allowed us to conclude that with the help of highly efficient use of bioclimatic resources in the post-virgin regions of the Urals and Western Siberia under the conditions of modern natural and anthropogenic changes, a significant (2.0–2.5 times) increase in the yield of grain crops is possible compared to the current level. As priorities, when developing adaptive technological methods, along with the careful implementation of technological discipline, one should also consider the technological methods aimed at more complete preservation of atmospheric precipitation and efficient use of soil moisture, including no-till technologies and components of “digital technologies”, as well as pay attention to the development of irrigation.

Keywords: *post-virgin regions, agro-climatic resources, climatically secured yield, limiting factors, growth reserves.*

Гулянов Юрий Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, старший научный сотрудник отдела степеведения и природопользования, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение ФГБУН Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН); 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11; e-mail: iury.gulynov@yandex.ru.

Gulyanov Yuriy Aleksandrovich, Dr. Sc. (Agr.), professor, senior researcher of the Department of steppe studying and environmental management, Institute of the Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Orenburg Federal Research Center” of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 11, Pioneer str., Orenburg, 460000, Russia; e-mail: iury.gulynov@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 03.09.2020.

Дата принятия к печати – 12.10.2020.