

УДК 51-7:633.11:57.014

ПРОСТАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЗЕРНА

Кирста Юрий Богданович¹,
kirsta@iwep.ru

Пузанов Александр Васильевич¹,
puzanov@iwep.ru

Рождественская Тамара Анатольевна¹,
rtamara@iwep.ru

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

Цель: разработка универсальной интегрированной методологии и статистико-имитационной модели для долгосрочного прогноза содержания токсичных химических элементов в урожаях зерновых культур.

Объекты. Исследование основано на системном подходе и проведено на примере пшеницы, выращиваемой в Алтайском крае – одном из основных зернопроизводящих регионов России. Образцы пшеницы были отобраны в 10 районах, несколько различающихся по климатическим условиям. Всего было изучено содержание 19 химических элементов (Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn, Al, As, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, P). Показано, что концентрации Pb (свинец), Cr (хром), Cu (медь) и Na (натрий) в зерне пшеницы зависят от климатических особенностей района возделывания.

Методы. Установлены регрессионные зависимости содержания элементов от среднеемноголетних месячных значений температуры воздуха и осадков. На основе регионального векового климатического цикла, нормализации и пространственного обобщения температуры воздуха и осадков, обеспечивающих единообразную динамику их относительных месячных значений (в процентах) по всему исследуемому региону, был составлен прогноз их изменений к 2030 г.

Результаты. Процедура отбора проб зерна, ГИС-технологии для обработки метеорологических и картографических данных, методы прогнозирования изменений климата и определения количественных взаимосвязей содержания химических элементов в зерне с климатическими характеристиками – все вместе составляют методологию, позволившую разработать прогностическую модель содержания токсичных веществ в пшенице. Модель использована для оценки изменений Pb, Cr, Cu и Na в зерне пшеницы к 2030 г. Содержание других элементов в пшенице слабо коррелирует с многолетними изменениями температуры воздуха и осадков, поэтому оно вряд ли может существенно измениться. После 2030 г. концентрации Pb, Co (кобальт) и Cr в пшенице, поставляемой на элеваторы из некоторых муниципальных районов, превысят их допустимые уровни для продовольственного зерна.

Ключевые слова:

Зерно пшеницы, тяжелые металлы, прогноз, климат, Россия.

Введение

Проблема неблагоприятного воздействия изменений климата на качество продукции сельскохозяйственного производства и, следовательно, на здоровье человека уже давно стоит на повестке дня [1]. Повышение допустимых уровней токсичных веществ в продовольственном зерне является неотъемлемой частью этой проблемы. Методы сохранения качества зерна в изменяющихся климатических условиях могут включать замену одних культур другими с меньшим накоплением токсичных веществ, применение очищенных от тяжелых металлов удобрений, изменение технологий возделывания сельскохозяйственных культур и улучшение управления [2]. Проверка эффективности выбранных методов требует долгосрочных прогнозов качества зерна на основе ограниченного объема данных наблюдений за развитием сельскохозяйственных культур в конкретном регионе. Длительные периоды мониторинга качества зерна, необходимые для составления стандартных прогнозов, значительно замедляют проверку новых методов и становятся непрактичными. Неудивительно, что публикаций на эту тему очень мало.

Большинство существующих прогностических моделей, по которым оценивают содержание токсичных веществ в сельскохозяйственных культурах в зависимости от характеристик почв и концентраций токсикантов в почвах [3–8], от орошения сточными водами [9–11], от сортов и технологий возделывания зерновых культур [12], являются регрессионными. До сих пор не существует надежных методов долгосрочного прогнозирования качества зерна и содержания в нем токсикантов при изменяющихся климатических условиях. Это затрудняет разработку и принятие своевременных мер по предотвращению неблагоприятных последствий изменения климата в зернопроизводящих регионах. Попытки оценить влияние повышения температуры и концентрации CO₂ в атмосфере на содержание тяжелых металлов за несколько лет не изменили ситуацию к лучшему [13, 14].

Наше исследование посвящено разработке универсальной интегрированной методологии для прогноза концентраций химических элементов (свинца, кадмия, кобальта, хрома, меди и других) в зерне яровой пшеницы к 2030 г. на примере Алтайского края, одного из крупнейших зернопроизводящих регионов Российской Федерации. В настоящее время производ-

ство зерна пшеницы в России дает пятую часть ее мирового экспорта. В 2017 г. Россия вошла в число ведущих стран по экспорту зерна, впервые обогнав Соединенные Штаты и Канаду. Россия планирует увеличить свой экспорт на 50 % к 2024 г., постепенно захватывая экспортом Евразию, Африку и Латинскую Америку. Ранее лидирующие поставщики пшеницы – фермеры Европы, США и Канады – в максимальной степени используют механизацию и удобрения и ограничены в дальнейшем увеличении производства зерна.

Содержание химических элементов в зерновых зависит от климата и трудно учитываемых местных условий возделывания сельскохозяйственных культур, включая особенности почвы, севооборот, применение химических удобрений и другие факторы. Поэтому мы использовали статистические методы обработки данных, применяемые при долгосрочном прогнозировании малоизученных сложных процессов, оставаясь при этом в рамках системного подхода. Новая методология обработки данных и статистическая имитационная модель, предложенные в данной работе, направлены на решение проблемы долгосрочных прогнозов, основанных на краткосрочных наблюдениях. Именно такие прогностические методы необхо-

димы для проверки новых адаптивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата.

Материалы и методы

При разработке универсальных прогностических моделей для оценки долгосрочных изменений химических элементов, присутствующих в злаках, необходимо перейти от конкретных единиц измерения анализируемого вещества к безразмерным характеристикам [15]. Измерения концентраций анализируемого вещества в зерне мы проводили методом атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. Точность данных составила 4–27 % при доверительном уровне 95 % [16]. Мы нормировали данные о концентрации каждого элемента к его среднему значению для десяти муниципальных районов Алтайского края и выразили их в процентах от этого среднего значения (табл. 1). Выбранные районы (1. Кытмановский, 2. Целинный, 3. Павловский, 4. Романовский, 5. Родинский, 6. Ключевской, 7. Алейский, 8. Егорьевский, 9. Третьяковский, 10. Краснощековский) различались по климатическим условиям и входили в группу основных производителей зерна на характеризующей территории.

Таблица 1. Содержание химических элементов в зерне яровой пшеницы (2018–2019 гг.), нормированное на средние значения по территории, %

Table 1. Chemical elements content in spring wheat grain (2018–2019) normalized to average values over the territory, %

Химич. элемент Chemical element	Номер района пробы Sampling district number										Среднее, мг/кг Average, mg/kg Dry wt	Допуст. уровень ^a , мг/кг MAC ^a , mg/kg Dry wt
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Pb	34,5	37,53	56,3	133,17	133,17	169,49	127,12	133,17	96,85	78,69	0,17	0,5 , 0,2–0,3
Cd	45,05	103,6	108,11	45,05	148,65	144,14	45,05	108,11	117,12	135,14	0,022	0,1 , 0,1–0,2
Co	9,17 ^c	9,17 ^c	9,17 ^c	148,62	89,91	104,59	177,98	201,83	161,47	88,07	0,054	0,01
Cr	108,4	83,9	108,4	111,9	118,9	132,9	73,4	118,9	87,4	55,9	2,86	1,0
Cu	106,64	117,13	78,67	111,89	110,14	106,64	104,9	115,38	82,17	66,43	5,72	20
Ni	35,61	83,09	68,25	127,6	130,56	94,96	97,92	225,52	80,12	56,38	0,34	1,0
Zn	125,62	152,71	76,35	113,3	105,91	105,91	91,13	76,35	88,67	64,04	40,6	100
Al	56,95	125,28	63,78	116,17	100,23	125,28	184,51	50,11	111,62	66,06	43,9	–
Ba	150,63	87,87	125,52	83,68	79,50	125,52	58,58	125,52	71,13	92,05	2,39	–
Ca	99,52	102,21	99,52	107,58	10,22	115,65	110,27	102,21	134,48	118,34	3718	–
Fe	116,07	133,93	108,63	84,82	111,61	114,58	92,26	78,87	83,33	75,89	67,2	–
K	109	85,31	87,68	90,05	99,53	113,74	97,16	130,33	99,53	87,68	4,22	–
Mg	107,96	106,13	96,07	100,18	110,7	150,96	90,58	135,41	13,08	88,75	1093	–
Mn	91,06	106,24	80,94	97,81	106,24	111,3	97,81	119,73	96,12	92,75	59,3	–
Mo	40,12	19,55	56,58	95,68	22,63	59,67	339,51	87,45	226,34	52,47	0,98	–
Na	76,82	69,14	57,62	69,14	172,86	179,26	96,03	140,85	69,14	69,14	78,1	–
P	98,67	90,67	88	88	88	114,67	117,33	117,33	106,67	90,67	3750	–
As ^b	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<0,05	0,2 , 0,5
Hg ^b	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<ПО <LOD	<0,005	0,03 , 0,02

^a Предельно допустимая концентрация (ПДК) тяжелых металлов в хлебном зерне в соответствии с российскими (жирный шрифт), FAO/ВОЗ или китайскими стандартами [3, 17, 18]. ^b Концентрации мышьяка (As) и ртути (Hg) во всех образцах были ниже предела обнаружения (<ПО), т. е. <0,05 и <0,005 мг/кг соответственно. ^c Концентрация кобальта (Co) в зерне не превышала ПО 0,01 мг/кг. Поэтому мы взяли ½ ПО как среднее значение возможных концентраций Co и выполнили нормировку.

^a Maximum allowable concentration (MAC) of heavy metals in bread-grain according to the Russian (bold font), FAO/WHO or Chinese standards [3, 17, 18]. ^b Concentrations of arsenic (As) and mercury (Hg) in all samples were less than limit of detection (<LOD), i. e. <0,05 and <0,005 mg/kg, respectively. ^c Grain cobalt (Co) concentration did not exceed LOD of 0,01 mg/kg. Because of this, we took ½ LOD as the average of the possible Co concentrations and normalized it.

Для оценки изменений климата в Алтайском крае и прилегающих территориях мы использовали 11 реперных метеостанций с наблюдениями 1984–2016 гг. [19]. Согласно разработанному методу нормализации и пространственного обобщения метеорологических данных [20, 21], наблюдаемые значения температур воздуха и осадков за каждый месяц каждого года были пересчитаны в проценты относительно их средне-многолетних значений «in situ». Ряды среднемесячных температур воздуха теплого сезона были нормированы на средне-многолетнее значение «in situ» за июль, тогда как холодного периода – на абсолютное средне-многолетнее значение за январь, а месячные ряды осадков – на средне-многолетнее значение «in situ» за июль. Такие нормированные значения позволяют единообразно описывать внутригодовую и многолетнюю динамику температуры и осадков над равнинными и горными районами. Эта динамика однородна для больших регионов, поскольку она формируется мезомасштабными процессами атмосферной циркуляции. Отметим, что предложенное описание метеорологических характеристик позволило разработать высоко адекватные модели агроэкосистем в России и США, а также водного и гидрохимического стоков рек для обширных горных районов [15, 20, 22]. Чтобы вернуться к общепринятым единицам измерения метеорологических факторов (°C, мм), достаточно иметь их средне-многолетние значения за январь и июль для характеризующего района.

Результаты

Прогноз изменений температур воздуха и осадков к 2030 году

В настоящее время с большей или меньшей эффективностью применяется большое количество эмпирически-статистических и детерминированных методов долгосрочных метеорологических прогнозов, а также их различных комбинаций [23, 24]. Первые используют статистические закономерности атмосферных процессов и требуют максимального объема и однородности исследуемых рядов метеорологических данных [21]. Последние основаны на физических законах атмосферных или атмосферно-океанических процессов и описывают их сложными уравнениями, как, например, в моделях NCEP и WRF-ARW [25, 26].

Системный анализ динамики климата для зернопроизводящей зоны России показывает, что эта динамика подчиняется региональному вековому климатическому циклу, состоящему из трех 33-летних фаз [19, 27, 28]. Эти фазы характеризуются определенными статистическими закономерностями долгосрочных изменений нормированных температур воздуха и осадков и охватывают 1918–1950, 1951–1983, 1984–2016 гг. Климатические циклы формируются вследствие длительного ритмического влияния растительности и человека на атмосферу. К сожалению, современные климатические модели его не учитывают.

Мы полагаем, что в следующем десятилетии интенсивность антропогенной деятельности, влияющей на климат, вряд ли будет критической. Поэтому мы использовали метеорологические характеристики

третьей климатической фазы как наиболее близкие к прогнозируемому периоду для оценки изменений температуры воздуха и осадков к 2030 г. Мы нормировали и пространственно обобщили (усреднили по 11 реперным метеостанциям) месячные значения этих факторов за 1984–2016 гг., а затем по полученным данным рассчитали многолетние линейные тренды факторов для каждого месяца года. Экстраполируя тренды, мы получили нормированные месячные значения температуры воздуха и осадков на 2030 г. (рис. 1, 2). Эффективность предлагаемого метода построения климатических трендов подтверждается успешными долгосрочными прогнозами температуры воздуха, осадков и урожайности пшеницы в США и России (Сибирский федеральный округ и Алтайский край) [20, 22, 27, 28].

Прогноз свидетельствует о снижении среднемесячной температуры воздуха в январе (~20 %), ее повышении в марте и апреле (>20 %) и стабильной (практически неизменной) температуре в другие месяцы к 2030 г. Прогнозируемые изменения месячных осадков разнонаправлены по месяцам года. Как указывалось выше, прогноз нормированных климатических характеристик является одинаковым по всему Алтайскому краю, независимо от орографической и климатической неоднородности его территории.

Взаимосвязь между содержанием химических элементов в зерне пшеницы и климатическими условиями

Долгосрочные изменения температуры воздуха и осадков влияют на гидрохимический сток с ландшафтов [15] и постепенно меняют биогеохимические условия возделывания зерновых культур. Поскольку короткий период наблюдений (2018–2019 гг.) концентраций химических элементов в зерне пшеницы (табл. 1) не позволяет установить для них какую-либо прямую зависимость от климатических факторов, мы сравнили концентрации со средне-многолетними значениями среднемесячной температуры воздуха и месячных осадков, соответствующими каждому из 10 муниципальных районов выборки. Для оценки этих месячных значений мы использовали Интерактивный Агроэкологический атлас России и соседних стран [29]. Для их расчетов была использована ГИС-платформа ArcGIS Desktop 10.0. Затем, используя метод, описанный в разделе «Материалы и методы», мы нормировали температуру воздуха и осадки на их средние для территории Алтайского края значения в январе и июле. Если в предыдущем случае мы получили временную динамику этих факторов (рис. 1, 2), то теперь – пространственные изменения их средне-многолетних значений. Таким образом, исследуемые районы получили свои собственные средне-многолетние нормированные значения климатических факторов. В результате стало возможным связать 10 измеренных концентраций каждого анализируемого вещества (табл. 1) с 10 различными нормированными значениями климатических характеристик для каждого месяца.



Рис. 1. Тренды 1984–2016 гг. регионального векового климатического цикла и прогноз изменений пространственно обобщенной нормированной температуры воздуха до 2030 г. для 12 месяцев года (T_i , $i=1-12$) [19]

Fig. 1. Trends (1984–2016) of the regional age-long climatic cycle and forecast of changes in spatially generalized normalized air temperature up to 2030 for 12 months of the year (T_i , $i=1-12$) [19]

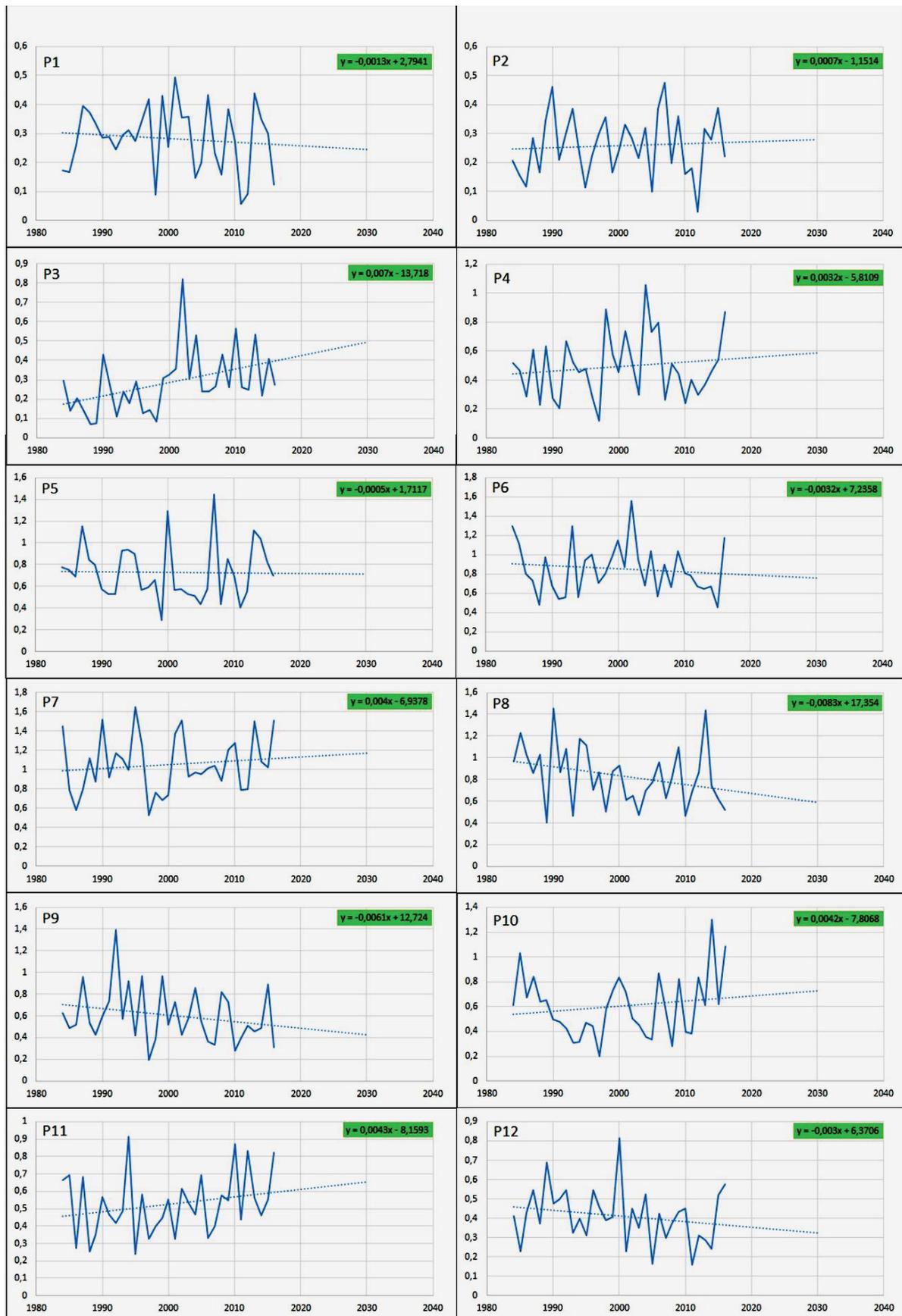


Рис. 2. Тренды 1984–2016 гг. регионального векового климатического цикла и прогноз изменений пространственно обобщенных нормированных осадков до 2030 г. для 12 месяцев года (P_i , $i=1-12$) [19]

Fig. 2. Trends (1984–2016) of the regional age-long climatic cycle and forecast of changes in spatially generalized normalized precipitation up to 2030 for 12 months of the year (P_i , $i=1-12$) [19]

Чтобы наиболее адекватно описать концентрацию анализируемого вещества в зерне пшеницы в зависимости от температуры воздуха и осадков, мы определили отдельное влияние месячных значений этих факторов. С этой целью была найдена корреляция между нормированным содержанием каждого химического элемента и среднесезонными нормированными значениями среднесезонной температуры воздуха и месячных осадков. Затем мы определили месяцы с наилучшими коэффициентами корреляции. Объединив эти месяцы, мы рассчитали окончательные коэффициенты корреляции между концентрацией анализируемого вещества и климатическими факторами (табл. 2). В табл. 2 наибольшие коэффициенты корреляции выделены жирным шрифтом. Большинство химических элементов оказались нечувствительными к изменениям температуры и осадков, что в целом согласуется с результатами других исследований (например, [30]). Для элементов, чувствительных

к климатическим условиям, увеличение количества осадков (P_5, P_6, P_7, P_8) приводит к снижению их концентрации в зерне, в отличие от влияния температуры воздуха (T_5, T_6, T_7, T_8) за период роста. Оказалось, что содержание Cu и Cr отрицательно коррелирует не только с осадками, но и с температурой воздуха в зимний период. Вероятно, это связано с климатом Алтайского края, характеризующимся долгой холодной зимой и коротким теплым летом. В муниципальных районах с более теплыми зимами сезон роста пшеницы длится дольше и урожайность намного выше. При относительно равных количествах соединений Cu и Cr , поглощаемых пшеницей из почвы в период налива зерна, концентрация Cu и Cr в урожае, очевидно, будет уменьшаться с увеличением урожайности. Аналогичное объяснение справедливо и для осадков, что согласуется и с отсутствием корреляции между концентрациями Cu в зерне пшеницы и почве [30].

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между нормированным содержанием анализируемого вещества в зерне яровой пшеницы (табл. 1) и среднесезонными нормированными месячными значениями температуры воздуха ($T_i, i=1-12$) и осадков ($P_i, i=1-12$)

Table 2. Correlation coefficients between the normalized analyte content in spring wheat grain (Table 1) and the long-term average normalized monthly values of air temperature ($T_i, i=1-12$) and precipitation ($P_i, i=1-12$)

Химический элемент Chemical element	$(T_5+T_6+T_7+T_8)/4$	$(T_{12}+T_1+T_2+T_3)/4$	$(P_1+P_2+\dots+P_{12})/12$	$(P_5+P_6+P_7)/3$	$(P_7+P_8)/2$
Pb	0,82	-0,32	-0,77	-0,65	-0,74
Cd	0,18	0,25	-0,15	-0,07	-0,16
Co	0,41	0,06	-0,28	-0,22	-0,36
Cr	0,69	-0,76	-0,83	-0,86	-0,84
Cu	0,48	-0,80	-0,62	-0,72	-0,71
Ni	0,60	-0,42	-0,56	-0,62	-0,70
Zn	-0,09	-0,46	-0,13	-0,21	-0,18
Al	0,28	-0,10	-0,19	-0,14	-0,18
Ba	0,09	-0,25	-0,13	-0,18	-0,13
Ca	-0,26	0,53	0,47	0,49	0,39
Fe	0,05	-0,43	-0,17	-0,25	-0,17
K	0,50	-0,25	-0,46	-0,47	-0,59
Mg	0,64	-0,68	-0,67	-0,67	-0,61
Mn	0,56	-0,34	-0,56	-0,57	-0,72
Mo	0,06	0,29	0,16	0,19	0,11
Na	0,78	-0,45	-0,81	-0,74	-0,82
P	0,45	0,06	-0,22	-0,19	-0,36
Ожидаемые изменения T_i, P_i к 2030 г., % Expected changes in T_i, P_i by 2030, %	108,0	90,3 ^a	104,4	105,0	101,5

^a Модуль зимних температур <100 % означает более теплые зимы/Winter temperature modulus <100 % means warmer winters.

Pb, Cr, Cu и Na в наибольшей степени зависят от климатических условий (табл. 2, выделены жирным шрифтом). Нами установлены линейные регрессии их содержания в зерне пшеницы от среднесезонных значений температуры воздуха и осадков для Алтайского края. Возведя в квадрат коэффициенты корреляции из табл. 2, мы также рассчитали надежность аппроксимации R^2 (коэффициент детерминации) для этих регрессий. Значения R^2 для выбранных металлов изменяются в пределах 0,51...0,74. Для уровня значимости 5 % наименьшее из полученных значений критерия Стьюдента $t_{расч}$ составило 2,88 при $t_{табл}(10-2; 0,025)=2,31$. Превышение

$t_{расч}$ над $t_{табл}$ свидетельствует о достаточно высокой надежности полученной аппроксимации.

Характеристики почвы с другими сельскохозяйственными факторами влияют на разброс данных относительно линий регрессии и должны значительно снижать коэффициент детерминации R^2 . В то же время характер почв в агроэкосистемах не может существенно измениться за десятилетие. Учитывая это и нормализацию метеорологических факторов «in situ», мы можем использовать установленные зависимости для прогноза изменений концентраций химических элементов в зерне пшеницы к 2030 г. При этом добавление ожидаемых изменений к наблюдаемым кон-

центрациям позволяет избежать ошибок прогноза, вносимых характеристиками почвы.

Прогнозирование содержания химических элементов в зерне пшеницы к 2030 году

Для прогноза содержания химических элементов в урожае зерновых использовано следующее линейное имитационное уравнение:

$$FC = CC + k \times (MV30 - MV),$$

где FC – прогнозируемое содержание анализируемого вещества (Pb, Cr, Cu, Na) в зерне пшеницы к 2030 г.; CC – текущее значение содержания (2018–2019); k – коэффициент наклона линейной регрессии для содержания анализируемого вещества в зависимости от климатических условий; MV – среднеголетние месячные значения осадков или температуры воздуха «in situ»: $[P_1 + P_2 + \dots + P_{12}] / 12$, $[P_5 + P_6 + P_7] / 3$, $[P_7 + P_8] / 2$, $[T_5 + T_6 + T_7 + T_8] / 4$, $[T_{12} + T_1 + T_2 + T_3] / 4$ (табл. 2); $MV30$ – аналогичные значения осадков или температуры воздуха, но прогнозируемые на 2030 г. Прогнозное урав-

нение характеризует увеличение или уменьшение содержания химических элементов в зерне в зависимости от изменения $(MV30 - MV)$ у климатических характеристик.

Ожидаемые к 2030 г. концентрации Pb, Cu и Na в зерне пшеницы указывают на то, что в период вегетации влияние температуры воздуха намного выше, чем влияние осадков. Это объясняется небольшими градиентами линий регрессии их содержания по отношению к осадкам, а также разнонаправленными изменениями последних (рис. 2). Это также подтверждается множественными регрессиями для Pb, Cu и Na в зависимости от температуры и осадков. Напротив, Cr демонстрирует сопоставимое влияние обоих климатических факторов. Рис. 3 демонстрирует наиболее значительные (ожидаемые к 2030 г.) изменения концентраций Pb, Na, Cu и Cr в зерне. Содержание Pb и Na заметно увеличивается, в то время как содержание Cu и Cr уменьшается.

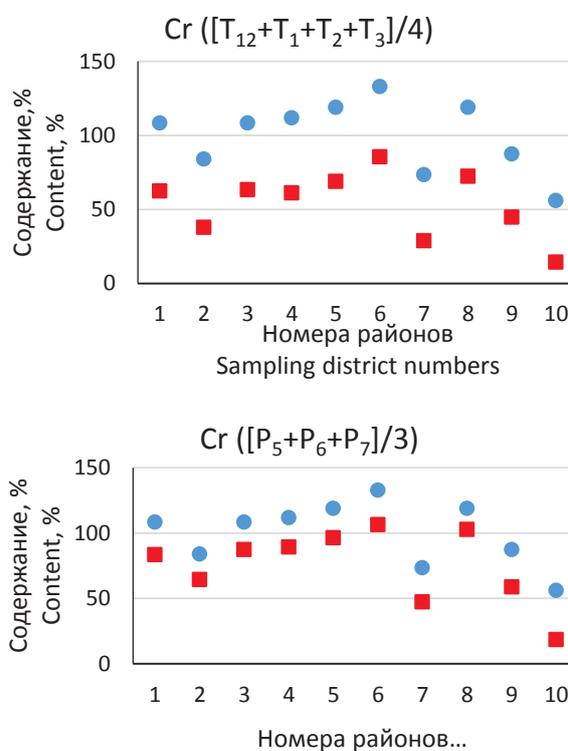
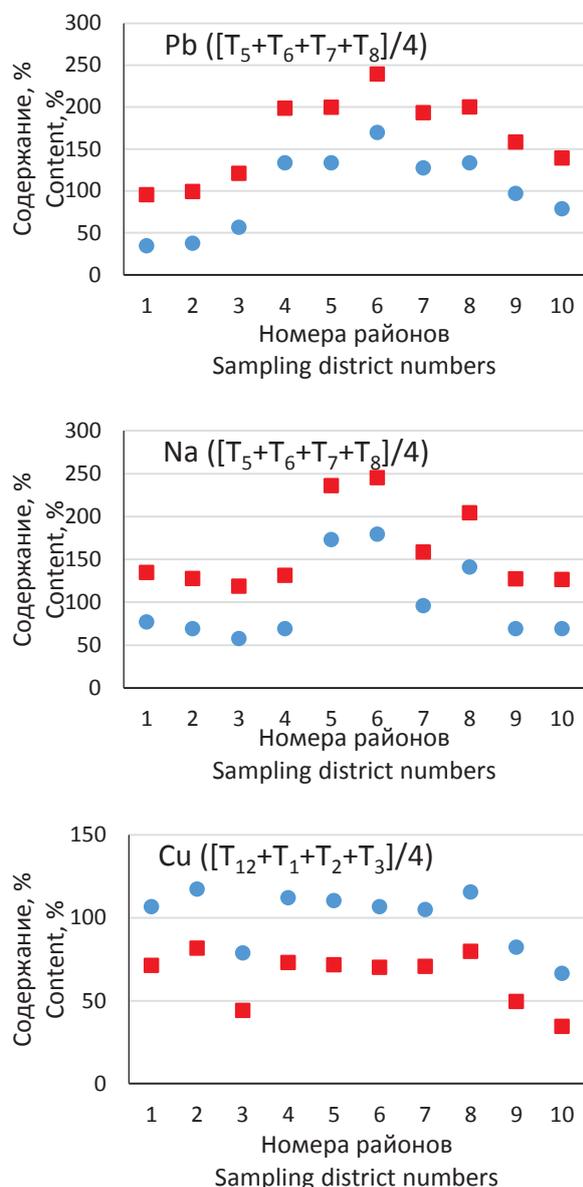


Рис. 3. Содержание свинца (Pb), натрия (Na), меди (Cu) и хрома (Cr) в урожаях пшеницы из 10 отобранных муниципальных районов Алтайского края в процентах от их средних значений по территории (табл. 1). (●) – измеренные в 2018–2019 гг., (■) – прогнозируемые на 2030 г., T_i , P_i – средне-голетние значения температур воздуха и осадков для месяца i , $i=1-12$

Fig. 3. Content of lead (Pb), sodium (Na), copper (Cu) and chrome (Cr) in wheat crop yields from 10 sampling municipal districts of Altai Krai in percentage of their averages for the territory (Table 1). (●) – measured in 2018–2019, (■) – predicted for 2030, T_i , P_i – long-term average air temperature and precipitation for month i , $i=1-12$

Обсуждение

Прогноз (рис. 3) позволяет оценить критические изменения содержания химических элементов в урожаях пшеницы к 2030 г. Во-первых, рассмотрим зависимость Pb от температуры воздуха $[T_5+T_6+T_7+T_8]/4$ в течение вегетационного периода с мая по август. Эта зависимость указывает на значительное увеличение содержания Pb – до 200–250 % в 4-м, 5-м, 6-м, 7-м и 8-м районах Алтайского края к 2030 г. Как указывалось выше, влияние осадков незначительно, и этот прогноз остается неизменным. Перевод процентов в единицы измерения анализируемого вещества мг/кг (табл. 1) показывает, что к 2030 г. концентрации Pb в зерне, например, в 6-м округе достигнут:

(Среднее содержание Pb) $\times 250/100 = 0,1652 \times 2,5 = 0,41$ мг/кг.

Полученное значение критически близко к ПДК для Pb в продовольственной пшенице, т. е. 0,5 мг/кг (табл. 1). После 2030 г. содержание Pb в некоторых партиях зерна, доставляемых на зернохранилища, превысит 0,5 мг/кг из-за его статистических колебаний, вызванных факторами окружающей среды. Отметим, что Pb является одним из приоритетных пищевых токсикантов.

К 2030 г. содержание Na в зерне будет расти, тогда как Cu – падать (рис. 3, Na, Cu). Для Na, Cu и Pb влияние температуры значительно превышает влияние осадков. Поэтому их прогноз адекватно отражает последствие изменения климата. ПДК для Na отсутствует, поэтому увеличение его концентрации не влияет на качество зерна. ПДК для Cu значительно превышает его текущее и ожидаемое содержание (табл. 1, рис. 3, Cu), следовательно, по Cu качество зерна останется неизменным.

Рассмотрим еще один приоритетный пищевой токсикант, а именно Cr (рис. 3, Cr). Ожидается, что к 2030 г. его содержание в зерне значительно сократится из-за изменений температуры и осадков. Неожиданно оказалось, что построение в Excel множественной линейной регрессии для Cr устраняет влияние обоих факторов. Другими словами, механистически построенная множественная линейная регрессия может потерять надежные однофакторные взаимосвязи при использовании входных данных ограниченного объема. Целесообразно суммировать совокупный эффект температуры и осадков как независимых факторов (рис. 3, Cr), и содержание Cr к 2030 г., вероятно, приблизится к значению его ПДК 1,0 мг/кг. Его ПДК, принятая в Китае [3], намного ниже текущего содержания Cr в зерне (табл. 1), хотя и сопоставима с прогнозируемым. Таким образом, ухудшенное качество зерна пшеницы по содержанию Cr должно улучшиться к 2030 г. и даже стать нормальным для некоторых муниципальных районов Алтайского края.

Ситуация с Co также заслуживает внимания. ПДК для этого токсиканта в пять раз ниже текущего содержания Co в зерне пшеницы (табл. 1). Поскольку содержание Co не связано с климатическими факторами (табл. 2), качество зерна к 2030 г. останется неудовлетворительным. В России ПДК для Cr и Co не введены, и качество зерна считается высоким.

Содержание As и Hg в зерне пшеницы не превышает предела их измерений и намного меньше ПДК для продовольственного зерна (табл. 1). Содержание других химических элементов в зерне вряд ли существенно изменится и не будет препятствовать использованию пшеницы в пищевых целях. Наконец, напомним, что накопление токсикантов в злаках часто зависит от свойств почвы [31], которые достаточно стабильны и в данной работе не рассматриваются.

Заключение

Предлагаемая комплексная методика прогноза содержания химических элементов в урожаях зерновых культур основана на системном анализе и статистико-имитационном моделировании климатических процессов и процессов возделывания зерновых. Она включает прогнозные тренды температуры воздуха и осадков, а также модель линейной регрессии для химических элементов (Pb, Cr, Cu, Na), содержание которых в зерне пшеницы чувствительно к многолетним изменениям климата. Среднепогодные значения климатических характеристик, используемые для построения модели вместо ежегодных, существенно повышают адекватность выполняемых прогнозов.

Для прогноза (к 2030 г.) содержания химических элементов в зерне применяются два эффективных метода обработки метеорологических данных. Они различаются по последовательности временного усреднения, пространственного усреднения и нормализации метеорологических данных. Первый включает в себя усреднение «in situ» месячных значений температуры воздуха и осадков во времени, нормализацию «in situ» этих значений на свои средние и пространственное усреднение полученных данных. В результате формируется пространственно однородная многолетняя динамика нормированных месячных значений метеорологических факторов. Применяя эту динамику и региональный вековой климатический цикл, мы осуществляем долгосрочный прогноз изменений соответствующих факторов.

Второй метод включает в себя измененный порядок обработки данных, т. е. усреднение «in situ» месячных значений температуры воздуха и осадков по времени, усреднение полученных данных по пространству и нормализацию «in situ» временных средних значений на пространственные средние. В результате мы получаем пространственную динамику нормированных месячных значений климатических факторов для выполнения регрессионного анализа влияния климата на содержание химических элементов в урожаях зерновых культур, собранных в разных районах исследуемой территории.

Концентрации четырех металлов (Pb, Cr, Cu, Na) в зерне пшеницы зависят от климатических изменений. Адекватность линейных регрессий концентраций от климатических факторов подтверждена значимым коэффициентом детерминации R^2 . Разработанная методика обеспечивает адекватное прогнозирование концентраций анализируемых веществ в зерне на 2030 г. Из прогноза следует, что после 2030 г. содержание свинца (Pb), хрома (Cr) и кобальта (Co) в некоторых партиях пшеницы, доставляемых на зернохранилища в Алтайском крае, превысит ПДК для продовольствен-

ного зерна. В России текущие климатические изменения способствуют повышению урожайности пшеницы, но, с другой стороны, оказывают определенное неблагоприятное воздействие на качество зерна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gomez-Zavaglia A., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems // Food Research International. – 2020. – V. 134. – 109256.
2. Climate change and food security with emphasis on wheat / Eds. M. Ozturk, A. Gul. – London: Academic Press, 2020. – 384 p.
3. Cai K., Song Z. Bioconcentration, potential health risks, and a receptor prediction model of metal(loid)s in a particular agro-ecological area // Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – 1902.
4. Bioavailable arsenic and amorphous iron oxides provide reliable predictions for arsenic transfer in soil-wheat system / P. Chen, H.M. Zhang, B.M. Yao, S.C. Chen, G.X. Sun, Y.G. Zhu // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – V. 383. – 121160.
5. Exploring the spatially varying relationships between cadmium accumulations and the main influential factors in the rice-wheat rotation system in a large-scale area / M. Qu, J. Chen, B. Huang, Y. Zhao // Science of the Total Environment. – 2020. – V. 736. – 139565.
6. Wang Y., Su Y., Lu S. Predicting accumulation of Cd in rice (*Oryza sativa* L.) and soil threshold concentration of Cd for rice safe production // Science of the Total Environment. – 2020. – V. 738. – 139805.
7. Wheat (*Triticum aestivum* L.) grains uptake of lead (Pb), transfer factors and prediction models for various types of soils from China / X. Wu, Q. Cai, Q. Xu, Z. Zhou, J. Shi // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2020. – V. 206. – 111387.
8. Heavy metal distribution, relationship and prediction in a wheat-rice rotation system / Y. Zhou, Z. Jia, J. Wang, L. Chen, M. Zou, Y. Li, S. Zhou // Geoderma. – 2019. – V. 354. – 113886.
9. Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops / E.M. Eid, S.A. Alrumman, A.F. El-Bebany, K.F. Fawy, M.A. Taher, A.E.L. Hesham, G.A. El-Shaboury, M.T. Ahmed // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26 (1). – P. 392–401.
10. Eid E.M., Galal T.M., El-Bebany A.F. Prediction models for monitoring heavy-metal accumulation by wheat (*Triticum aestivum* L.) plants grown in sewage sludge amended soil // International journal of phytoremediation. – 2020. – V. 22 (10). – P. 1000–1008.
11. Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system / S. Rezapour, B. Atashpaz, S.S. Moghaddam, I.K. Kalavrouziotis, C.A. Damalas // Chemosphere. – 2019. – V. 231. – P. 579–587.
12. Efficient models for predicting durum wheat grain Cd conformity using soil variables and cultivars / C. Nguyen, A. Roucou, G. Grignon, J.Y. Cornu, B. Méléard // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – V. 401. – 123131.
13. Effects of elevated carbon dioxide on metal transport in soil-crop system: results from a field rice and wheat experiment / X.S. Luo, D. Zhang, Z. Hu, C. Liu, Z. Zhao, W. Sun, X. Fang, P. Fan // Journal of Soils and Sediments. – 2019. – V. 19 (11). – P. 3742–3748.
14. Responses of wheat and rice grain mineral quality to elevated carbon dioxide and canopy warming / J. Wang, L. Li, S.K. Lam, X. Liu, G. Pan // Field Crops Research. – 2020. – V. 249. – 107753.
15. Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for describing landscape hydrochemical discharge in mountain countries // Landscape Modelling and Decision Support.

Работа выполнена с использованием научных результатов гранта 22-27-00058 Российского научного фонда (анализ метеорологических данных – Юрием Богдановичем Кирстой).

- Innovations in Landscape Research / Eds. W. Mirschel, V. Terleev, K.O. Wenkel. – Cham: Springer, 2020. – P. 163–178.
16. Химические и спектральные методы. Методика НСАМ № 155-ХС. – М.: ФНМЦ «ВИМС», 2015. – 53 с.
17. Emurotu J.E., Onianwa P.C. Bioaccumulation of heavy metals in soil and selected food crops cultivated in Kogi State, north central Nigeria // Environmental systems research. – 2017. – V. 6. – 21.
18. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. – М.: Проспект, 2021. – 512 с.
19. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V., Puzanov A.V. The forecast of climate changes in altai-sayan mountain country till 2030 // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – V. 2534. – P. 114–117.
20. Kirsta Y.B. System-analytical modelling. Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // Ecological Modelling. – 2006. – V. 191. – P. 331–345.
21. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas // SN Applied Sciences. – 2020. – V. 2. – 1044.
22. Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. – Барнаул: Изд-во АГУ, 2014. – 283 с.
23. Parton K.A., Crean J., Hayman P. The value of seasonal climate forecasts for Australian agriculture // Agricultural Systems. – 2019. – V. 174. – P. 1–10.
24. Detecting improvements in forecast correlation skill: Statistical testing and power analysis / S. Siebert, O. Bellprat, M. Menegoz, D.B. Stephenson, F.J. Doblas-Reyes // Monthly Weather Review. – 2017. – V. 145 (2). – P. 437–450.
25. Сравнение прогнозов по региональной модели атмосферы при различных начальных и граничных условиях / Р.Ю. Игнатов, М.Ю. Зайченко, М.А. Толстых, К.Г. Рубинштейн, М.М. Курбатова // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 6. – С. 17–23.
26. The NCEP climate forecast system Version 2 / S. Saha, S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, et al. // Journal of Climate. – 2014. – V. 27. – P. 2185–2208.
27. Кирста Ю.Б. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Сибирского федерального округа до 2020 года // Проблемы региональной экологии. – 2011. – № 3. – С. 22–30.
28. Кирста Ю.Б., Курепина Н.Ю., Ловцкая О.В. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Алтайского края до 2020 года // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1. – С. 27–32.
29. Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения / под ред. А.Н. Афонин, С.Л. Грин, Н.И. Дзюбенко, А.Н. Фролов. 2008. URL: <http://www.agroatlas.ru> (дата обращения 11.02.2022).
30. Grain zinc, iron, and copper concentrations of wheat grown in Central Iran and their relationships with soil and climate variables / M. Karami, M. Afyuni, A.H. Khoshgoftarmansh, A. Papritz, R. Schulin // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2009. – V. 57 (22). – P. 10876–10882.
31. Heavy metal contents, distribution, and prediction in a regional soil-wheat system / J. Ran, D. Wang, C. Wang, G. Zhang, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 544. – P. 422–431.

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Кирста Ю.Б., доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН.

Пузанов А.В., доктор биологических наук, профессор, и.о. директора Института водных и экологических проблем СО РАН.

Рождественская Т.А., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН.

UDC 51-7:633.11:57.014

SIMPLE METHODOLOGY FOR LONG-TERM PREDICTION OF GRAIN QUALITY

Yuri B. Kirsta¹,
kirsta@iwep.ru

Alexander V. Puzanov¹,
puzanov@iwep.ru

Tamara A. Rozhdestvenskaya¹,
rtamara@iwep.ru

¹ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS,
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

The main aim: to develop the universal integrated methodology and statistical-simulation model for long-term forecasting the content of toxic chemical elements in grain crop yields.

Objects. The study was based on the system approach and carried out by the example of wheat cultivated in Altai Krai – one of the main grain-producing regions of Russia. Wheat crops were sampled in 10 municipal districts with different climatic conditions. A total of 19 chemical elements (Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn, Al, As, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, P) content was studied. It is shown that concentrations of Pb (lead), Cr (chrome), Cu (copper) and Na (sodium) in wheat grain depend on climatic characteristics of the cultivation area.

Methods. Regression dependences of the element content on the long-term average values of monthly air temperature and precipitation were established. Based on a regional age-long climatic cycle, normalization and spatial generalization of air temperature and precipitation providing the uniform dynamics of their relative monthly values (in percent) throughout the study region, a forecast of their changes by 2030 was made.

Results. A procedure for grain sampling, GIS technologies for processing meteorological and cartographic data, methods for predicting climate changes and establishment of quantitative relationships of chemical elements content in grain with climatic characteristics – all together make up the methodology that allows developing the predictive model for toxic substance present in wheat. The model was used for estimation of Pb, Cr, Cu and Na changes in wheat grain by 2030. The content of other elements in wheat weakly correlate with long-term changes in air temperature and precipitation; therefore, it can hardly change significantly. After 2030, concentrations of Pb, Co (cobalt) and Cr in wheat delivered to elevators from some municipal districts will exceed their maximum allowable levels for bread-grain.

Key words:

Wheat grain, heavy metals, forecast, climate, Russia.

The research was carried out using the scientific results of grant 22-27-00058 of the Russian Science Foundation (analysis of meteorological data – by Yuri B. Kirsta).

REFERENCES

- Gomez-Zavaglia A., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems. *Food Research International*, 2020, vol. 134, 109256.
- Climate change and food security with emphasis on wheat* [Climate change and food security with emphasis on wheat]. Eds. M. Ozturk, A. Gul. London, Academic Press, 2020. 384 p.
- Cai K., Song Z. Bioconcentration, potential health risks, and a receptor prediction model of metal(loid)s in a particular agro-ecological area. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, 1902.
- Chen P., Zhang H.M., Yao B.M., Chen S.C., Sun G.X., Zhu Y.G. Bioavailable arsenic and amorphous iron oxides provide reliable predictions for arsenic transfer in soil-wheat system. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 383, 121160.
- Qu M., Chen J., Huang B., Zhao Y. Exploring the spatially varying relationships between cadmium accumulations and the main influential factors in the rice-wheat rotation system in a large-scale area. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 736, 139565.
- Wang Y., Su Y., Lu S. Predicting accumulation of Cd in rice (*Oryza sativa* L.) and soil threshold concentration of Cd for rice safe production. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 738, 139805.
- Wu X., Cai Q., Xu Q., Zhou Z., Shi J. Wheat (*Triticum aestivum* L.) grains uptake of lead (Pb), transfer factors and prediction models for various types of soils from China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 206, 111387.
- Zhou Y., Jia Z., Wang J., Chen L., Zou M., Li Y., Zhou S. Heavy metal distribution, relationship and prediction in a wheat-rice rotation system. *Geoderma*, 2019, vol. 354, 113886.
- Eid E.M., Alrumman S.A., El-Bebany A.F., Fawy K.F., Taher M.A., Hesham A.E.L., El-Shaboury G.A., Ahmed M.T. Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26 (1), pp. 392–401.
- Eid E.M., Galal T.M., El-Bebany A.F. Prediction models for monitoring heavy-metal accumulation by wheat (*Triticum aestivum* L.) plants grown in sewage sludge amended soil. *International journal of phytoremediation*, 2020, vol. 22 (10), pp. 1000–1008.
- Rezapour S., Atashpaz B., Moghaddam S.S., Kalavrouziotis I.K., Damalas C.A. Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system. *Chemosphere*, 2019, vol. 231, pp. 579–587.
- Nguyen C., Roucou A., Grignon G., Cornu J.Y., Méléard B. Efficient models for predicting durum wheat grain Cd conformity using soil variables and cultivars. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 401, 123131.
- Luo X.S., Zhang D., Hu Z., Liu C., Zhao Z., Sun W., Fang X., Fan P. Effects of elevated carbon dioxide on metal transport in soil-crop system: results from a field rice and wheat experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, vol. 19 (11), pp. 3742–3748.
- Wang J., Li L., Lam S.K., Liu X., Pan G. Responses of wheat and rice grain mineral quality to elevated carbon dioxide and canopy warming. *Field Crops Research*, 2020, vol. 249, 107753.
- Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for describing landscape hydrochemical discharge in mountain countries. *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*. Cham, Springer, 2020. pp. 163–178.

16. *Khimicheskii i spektralnye metody. Metodika NSAM № 155-HS* [Chemical and spectral methods. Methodology NSAM no. 155-HS]. Moscow, FNMC «VIMS» Publ., 2015. 53 p.
17. Emurotu J.E., Onianwa P.C. Bioaccumulation of heavy metals in soil and selected food crops cultivated in Kogi State, north central Nigeria. *Environmental systems research*, 2017, vol. 6, 21.
18. SanPiN 2.3.2.1078-01. *Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov* [State Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products]. Moscow, Prospekt Publ., 2021. 512 p.
19. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V., Puzanov A.V. The Forecast of Climate Changes in Altai-Sayan Mountain Country till 2030. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2534, pp. 114–117.
20. Kirsta Y.B. System-analytical modelling. Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. *Ecological Modelling*, 2006, vol. 191, pp. 331–345.
21. Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, 1044.
22. Kirsta Yu.B., Kirsta B.Yu. *Informatsionno-fizicheskiy zakon postroyeniya evolyutsionnykh sistem. Sistemno-analiticheskoe modelirovaniye ekosistem* [Information-physical law of construction of evolutionary systems. System-analytical modeling of ecosystems]. Barnaul, AGU Publ., 2014. 283 p.
23. Parton K.A., Crean J., Hayman P. The value of seasonal climate forecasts for Australian agriculture. *Agricultural Systems*, 2019, vol. 174, pp. 1–10.
24. Siegert S., Bellprat O., Menegoz M., Stephenson D.B., Doblas-Reyes F.J. Detecting improvements in forecast correlation skill: statistical testing and power analysis. *Monthly Weather Review*, 2017, vol. 145 (2), pp. 437–450.
25. Ignatov, R.Y., Zaichenko, M.Y., Tolstykh, M.A. Comparison of regional atmospheric model forecasts under different initial and boundary conditions. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 378–383.
26. Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, pp. 2185–2208.
27. Kirsta Yu.B. The forecast of both climate and agroclimatic potential in Siberian federal okrug till 2020. *Regional Environmental Issues*, 2011, no. 3, pp. 22–30. In Rus.
28. Kirsta Yu.B., Kurepina N.Yu., Lovtskaya O.V. Forecast of climate and agroclimatic potential of the Altai region up to 2020. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2013, no. 1, pp. 27–32. In Rus.
29. *Agroekologicheskiy atlas Rossii i sopredelnykh stran: ekonomicheskii znachimye rasteniya, ikh vrediteli, bolezni i sornye rasteniya* [Agro-ecological atlas of Russia and neighboring countries: economically significant plants, their pests, diseases and weeds]. 2008. Available at: <http://www.agroatlas.ru> (accessed 11 February 2022).
30. Karami M., Afyuni M., Khoshgofarmanesh A.H., Papritz A., Schulin R. Grain zinc, iron, and copper concentrations of wheat grown in Central Iran and their relationships with soil and climate variables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, vol. 57 (22), pp. 10876–10882.
31. Ran J., Wang D., Wang C., Zhang G., Zhang H. Heavy metal contents, distribution, and prediction in a regional soil–wheat system. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 544, pp. 422–431.

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

Yuri B. Kirsta, Dr. Sc., professor, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Alexander V. Puzanov, Dr. Sc., professor, director, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Tamara A. Rozhdestvenskaya, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.