



ВЛИЯНИЕ АГРОХИМИКАТОВ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ И УРОЖАЙ БРОККОЛИ

© 2021 Н. В. Гопп

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: gopp@issa-siberia.ru

Цель исследования. Изучить влияние агрохимикатов (минеральных и органо-минеральных удобрений, регуляторов роста растений и мелиорантов) на пространственно-временные изменения свойств агросерой почвы и урожай брокколи с использованием картографического подхода.

Объекты и методы исследования. Полевой опыт проводили в 2016 году на участке, расположенном в окрестности села Быково на юго-востоке Западной Сибири (54°58'02.8"N; 83°5'21.45"E, Новосибирская область). Объекты исследования – агросерая ненасыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая почва (Luvisc Retiс Greyzemic Phaeozem (Siltic, Aric)) и капуста брокколи среднеспелого сорта «Линда». Схема опыта включала следующие варианты: (1) Контроль (без удобрений), (2) Фон (N100P60K160), (3) Фон + янтарная кислота, (4) Фон + доломит, (5) Фон + мульча, (6) Органо-минеральное удобрение «Криалл». Пробы почв проанализированы на содержание органического углерода, нитратного азота, общего, минерального и органического фосфора и его подвижной формы; обменного калия, кальция и магния, а также pH солевой вытяжки. В сухих образцах соцветий брокколи определяли общее содержание азота, фосфора, калия, кальция и магния.

Основные результаты. После применения агрохимикатов и сбора урожая брокколи коэффициенты вариации pH, содержания подвижных фосфора, калия и кальция увеличились в два и более раза. Использование агрохимикатов повысило урожай и улучшило питательную ценность соцветий брокколи. В вариантах с внесением минеральных удобрений наибольшая окупаемость удобрений получена в фоновом варианте. Внесение агрохимикатов проявилось в отрицательных (подкисление, связывание фосфора, кальция и магния) и положительных (повышение содержания элементов) эффектах. Имобилизация элементов питания (фосфора, кальция, магния) в труднорастворимых соединениях в почве и последующее снижение содержания подвижных форм не оказали отрицательного влияния на элементный состав соцветий брокколи. Таким образом, химическая иммобилизация приводит к закреплению элементов питания в верхнем горизонте почвы, что предотвращает их выщелачивание тальми и дождевыми водами в нижние горизонты.

Ключевые слова: геостатистика; кригинг; доломит; удобрения; pH; азот; фосфор; калий; кальций; магний

Цитирование: Гопп Н.В. Влияние агрохимикатов на пространственно-временные изменения агрохимических свойств почвы и урожай брокколи // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 2. e157. doi: 10.31251/pos.v4i2.157

ВВЕДЕНИЕ

Потеря плодородных почв, рост населения, урбанизация и изменение климата могут серьезно повредить производству продуктов питания, увеличить их стоимость и создать тяжелую ситуацию во всех странах (Lal et al., 1989; Pimentel, 2006; Govers et al., 2017). Большая часть сельскохозяйственных угодий в мире не удовлетворяет потребностям выращиваемых культур в минеральном питании из-за длительного использования почв и уязвимости перед текущими экзогенными и эндогенными процессами (эрозия, засоление, выщелачивание, уплотнение, заиливание, опустынивание и т.д.). Восполнение почвенных запасов элементов питания не осуществляется на должном уровне, что приводит к снижению урожайности и ухудшению качества продукции. В то же время внесение слишком большого количества минеральных удобрений приводит к неэффективному их использованию растениями, значительным потерям питательных веществ и загрязнению окружающей среды (Oldeman, 1988; Gastal, Lemaire, 2002; Geng et al., 2019). В этой связи, становятся все более актуальными научные исследования, которые, с одной стороны, позволяют увеличить производство продуктов питания, устранить дефицит и дисбаланс питательных элементов в почвах, а с другой стороны, минимизировать отрицательное воздействие на окружающую среду чрезмерных доз агрохимикатов, используемых для повышения урожайности.

В мировой практике методы цифрового картографирования эффективно используются для картографирования классов и свойств почв на основе экологических ковариат, рассчитываемых по данным дистанционного зондирования Земли (Sumfleth, Duttmann, 2008; Arrouays et al., 2014; Gopp et al., 2017; Chen et al., 2018; Soil organic..., 2018; Padarian et al., 2019; Suleymanov et al., 2021). Однако такой метод не подходит для крупномасштабного картографирования, когда расстояние между точками отбора проб почвы слишком мало и измеряется в сантиметрах, и при этом отсутствуют подробные данные дистанционного зондирования экологических ковариат с высоким пространственным разрешением. Поэтому альтернативными подходами для крупномасштабного агрохимического картографирования свойств почв являются методы геостатистической интерполяции, которые подробно описаны в литературе (Isaaks, Srivastava, 1989; Goovaert, 1997; Oliver, 2010; Красильников, 2009; Мешалкина и др., 2010; Демьянов, Савельева, 2010). Оценка пространственно-временных изменений плодородия почвы с помощью карт необходима для визуализации содержания питательных веществ в почве в каждой точке опробования. Сравнительный анализ карт помогает сделать выводы о влиянии агрохимикатов на изменение содержания питательных веществ в почве и происходящих в ней процессах, получить более подробную картину пространственно-временных закономерностей, а также оценить влияние питательных веществ почвы на продуктивность растений.

Опрос, проведенный в нескольких фермерских хозяйствах, показал, что большая часть землепользователей при внесении удобрений ориентируются на рекомендации, которые, как правило, не учитывают плодородие почв, а дозы удобрений рассчитываются на основе данных о выносе элементов питания планируемым урожаем. При таком подходе имеющиеся запасы элементов питания в почве не учитываются, следовательно, расчетные дозы вносимых удобрений на планируемый урожай будут высокими, что может привести к неблагоприятным последствиям для почвы и неоправданным финансовым затратам.

Одной из культур, перспективных для расширения ассортимента возделываемых овощей в Сибири (Фотев и др., 2018), является брокколи, достоинством которой является высокое содержание ценных питательных веществ: белка (3,2–4,5%), холина и метионина (4 мг/100 г), каротина (1,9–4,0 мг/100 г), сахара (1,5–3,8%), антиканцерогенного вещества (сульфорафана) (Иновационные технологии..., 2012; Потапова и др., 2016). Защитные эффекты от риска развития рака у человека при употреблении в пищу брокколи связаны с высоким содержанием серосодержащих гликозидов и продуктов их распада – изотиоцианатов (Verhoeven et al., 1996; Razis, Noor, 2013).

Исходя из установленных фактов, нами был поставлен эксперимент, в котором запасы элементов питания в почве не учитывали, а дозы минеральных удобрений были взяты из рекомендаций по выращиванию брокколи. Данный эксперимент позволил показать, что учет потенциального плодородия почв позволяет оптимизировать финансовые затраты, а также обосновать необходимость предварительной оценки запасов элементов питания в почве при расчете оптимальной дозы удобрений при выращивании брокколи.

Цель исследования – изучить влияние агрохимикатов (минеральных и органо-минеральных удобрений, регуляторов роста растений и мелиоранта) на пространственно-временные изменения свойств агросерой почвы и продуктивности брокколи с использованием картографического подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт проводили в 2016 году на участке, расположенном в районе села Быково (54° 58'02.8"N; 83°5'21.45"E) на юго-востоке Западной Сибири (Новосибирская область). В геоморфологическом отношении участок находится в северо-западной части Предсалаирской возвышенной равнины (Вдовин, Малолетко, 1969). Абсолютная высота 130 м над уровнем моря. Согласно природному районированию, территория участка находится в пределах лесостепной зоны, климат континентальный. Средние температуры: годовая – -0,3 – -0,6 °С, января – -19 °С, июля – +19 °С. Сумма средних суточных температур воздуха выше +10 °С колеблется от 1600 до 1800 °С·день. Количество осадков варьирует от 400 до 450 мм/год. Территория исследования относится к недостаточно увлажненной зоне, гидротермический коэффициент в пределах 1,0–1,2 (Атлас, 2002).

Объекты исследования – агросерая ненасыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая почва (Luvic Retic Greyzemic Phaeozem (Siltic, Aric)) и среднеспелый сорт

капусты брокколи «Линда». Агросерая почва опытного участка, диагностированная по полевому определителю почв России (2008), относится к среднегумусированному виду и характеризуется кислой реакцией среды, средним уровнем содержания нитратного азота, обменного калия и магния; повышенным – обменного кальция; очень высоким – подвижного фосфора. Содержание в почве основных элементов питания и гумуса снижалось с глубиной, за исключением подвижного фосфора, для содержания которого была характерна обратная тенденция (табл. 1).

Таблица 1

Агрохимическая характеристика агросерой почвы

Обозначение горизонта, глубина, см	pH _{кол}	Гумус, %	Содержание подвижных форм элементов, мг/кг			Содержание обменных катионов, смоль(экв)/кг	
			N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺
P , 0-30	5,0	4,0	15,5	230	102	12,4	1,8
AEL , 30-41	4,8	2,4	10,8	250	80	9,9	1,9
BEL , 41-80	4,8	0,7	4,3	320	85	11,7	1,7
BT , 80-110	4,8	0,4	1,8	300	56	12,0	0,8
C , 110-150	4,5	0,2	1,2	450	60	11,5	0,5

Образцы агросерой почвы отбирали из слоя 0–30 см (средняя проба из трех образцов, отобранных почвенным буром) под каждым растением (24 шт.) дважды за вегетационный период: после высадки рассады (05.06.2016 г.) и после уборки урожая (25.09.2016 г.). Пробы почв проанализированы: на содержание углерода мокрым озолением по Тюрину, pH солевой вытяжки – потенциометрическим методом, содержание нитратного азота – по Карпинскому-Замятиной (экстрагент 0,03 М K₂SO₄), подвижного фосфора – по Чирикову (экстрагент 0,5 М CH₃COOH), обменного калия по Масловой (экстрагент 1 М CH₃COONH₄), необменный калий по Прэт и Морсе (экстрагент 1 М HNO₃) (Агрохимические..., 1975; Практикум..., 2001; Минеев и др., 2001). Общий (P_{общ}), минеральный (P_{мин}) и органический фосфор (P_{орг}) определены по методу Сэндерса и Вильямса (Soil sampling..., 2008). По разнице значений между содержанием минерального и подвижного фосфора по Чирикову определяли фосфор труднорастворимых фосфатов. Обменные катионы (кальций, магний) извлекали 1 М CH₃COONH₄ с последующим определением на атомно-абсорбционном спектрометре.

Схема опыта включала следующие варианты: (1) Контроль (без удобрений); (2) Фон (N100P60K160); (3) Фон + янтарная кислота; (4) Фон + доломит; (5) Фон + мульча; (6) Органо-минеральное удобрение «Криалл». Дозы минеральных удобрений указаны в действующем веществе (д.в./га). В качестве источников азота, фосфора, калия и магния использовали следующие удобрения: нитрат аммония, обогащенный гуматом калия (34% N); двойной суперфосфат, обогащенный гуматом калия (38% P₂O₅); хлорид калия (60% K₂O), обогащенный магнием; органо-минеральное удобрение «Криалл».

Рассаду брокколи высаживали по схеме 50x50 см в двойные ряды с расстоянием между рядами 70 см (рис. 1, 2). Площадь экспериментального участка составляла 8 м² (2x4 м). Для брокколи характерно не одновременное созревание соцветий, поэтому степень зрелости определялась по появлению первого распускающегося цветка на соцветии. В сухих образцах соцветий брокколи определено общее содержание азота на CHN-анализаторе, фосфора – колориметрическим методом, а также калия, кальция, магния на атомно-абсорбционном спектрометре с предварительным сухим озолением образцов (Практикум..., 2001; Kalra, 1998).

Биологические особенности брокколи: достигает высоту 70–100 см; основная масса корней залегает на глубине 20–25 см; малотребовательна к теплу и плодородию почвы, влаголюбива; выдерживает заморозки до -7-10 °С. Оптимальные параметры окружающей среды: температура воздуха от +16 до +25 °С, относительная влажность воздуха – 85%, влажность почвы – 70% наименьшей влагоемкости, реакция среды почв – близкая к нейтральной (Инновационные технологии..., 2012).

Агрохимикаты вносили 4 раза за сезон в виде жидких корневых подкормок. Дозы NPK-удобрений в действующем веществе были переведены в физический вес и разделены на 4 части, которые растворяли в воде (8 л) перед непосредственным внесением в почву. Приготовленный раствор (0,5 л, pH = 7,2) вносили под каждое растение брокколи. Первое внесение агрохимикатов производили через неделю после высадки рассады. Последнее применение агрохимикатов

проводили за две недели до уборки соцветий брокколи. Брокколи поливали все лето водой ($pH=7,4$) из реки Мосиха практически через каждые два дня, так как в 2016 году наблюдался дефицит атмосферных осадков. Оросительная норма за весь сезон составила $2000 \text{ м}^3/\text{га}$.



Рисунок 1. Внешний вид брокколи после высадки рассады в грунт (5.06.2016 г.)

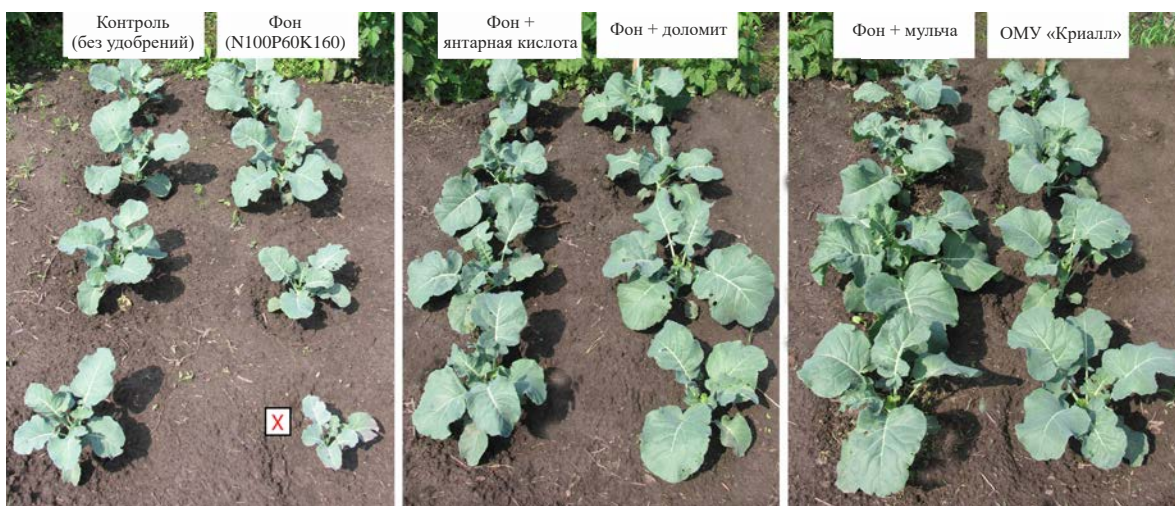


Рисунок 2. Внешний вид брокколи в фазу 5-6 листьев (06.07.2016 г.). Примечание: красным крестиком обозначено растение, отстающее в росте.

Янтарную кислоту вносили в почву 4 раза за сезон в виде 0,02% раствора ($pH 7,4$) по 0,5 л под каждое растение. Янтарная кислота (бутандиовая кислота, этан-1,2-дикарбоновая кислота) представляет собой двухосновную карбоновую кислоту, которая в небольших количествах содержится во многих растениях. Янтарная кислота стимулирует рост и увеличивает урожайность растений, улучшает обмен веществ и является активным компонентом органического синтеза.

Доломитовую муку, содержащую кальций (60% CaO) и магний (25% MgO), вносили в почву в виде суспензии (200 г на 10 л воды, $pH = 9,2$) по 0,5 л под каждое растение. Общая доза доломитовой муки, внесенной за весь сезон, составила $200 \text{ г}/\text{м}^2$. Количество воды, внесенное в вариантах с доломитом и янтарной кислотой, компенсировали в оставшихся вариантах опыта поливом чистой водой.

Сырую мульчу из свежескошенного и измельченного белого клевера вносили 4 раза за сезон (100 г под каждое растение), которую смешивали с верхним слоем почвы. Общий вес внесенной мульчи за весь сезон составил 400 г. Содержание биофильных элементов (в % на абсолютно сухое вещество) в мульче клевера было следующим: азот (N) – 3,5–4,0; фосфор (P) – 0,26–0,33; калий (K) – 2,0–2,9; кальций (Ca) – 2,2–2,6; магний (Mg) – 0,21–0,80; сера (S) – 0,20–0,30.

ОМУ «Криалл» вносили 4 раза за сезон в виде раствора (60 г на 10 л воды), объем вносимого раствора под каждый куст составлял 1 л (рН=7,4). В ОМУ «Криалл» содержатся (в % на сухое вещество): азот (N) – 11,5; фосфор (P₂O₅) – 12; калий (K₂O) – 14; кальций (CaO) – 1,57; магний (MgO) – 0,36; железо (Fe) – 0,2; марганец (Mn) – 0,005; цинк (Zn) – 0,002; медь (Cu) – 0,0003; бор (B) – 0,2; молибден (Mo) – 0,0001. Общая доза элементов питания, внесенная за весь сезон, составила: N30; P30; K40; Ca4; Mg0,9; Fe0,5; Mn0,011; Zn0,005; Cu0,0008; B0,5; Mo0,0003 (кг/га). При производстве ОМУ «Криалл» в качестве исходного сырья используют опилки, древесную золу, сапрпель, или только перегной. Кроме вышеназванных элементов в удобрении содержатся полезные почвенные микроорганизмы, антисептики и дубильные вещества. Разработчиками ОМУ «Криалл» являются новосибирские ученые Кривоуцкая Л.М. и Кривоуцкий В.С.

Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного анализа ANOVA. Сравнение вариантов (post hoc test) проводили по методу Бонферони, а также с помощью расчета наименьшей существенной разницы (НСР). Степень интенсивности вариации (CV, %) оценивали по шкале, которая предложена И.И. Елисеевой и М.М. Юзбашевым (2002): слабая (CV<10 %); умеренная (CV от 10 до 25%); сильная (CV>25 %).

Для определения направления анизотропии (с азимутами 0°, 45° и 90°) изучаемых параметров для разных сроков отбора образцов составляли экспериментальные и теоретические вариограммы в программном обеспечении VARIOWIN 2.21 (Pannatier, 1996). С использованием таких параметров как нагет эффект, радиус, порог, анизотропия, полученных в результате подгонки теоретической модели к экспериментальной, проводили интерполяцию значений между точками отбора образцов методом ординарного кригинга в программном обеспечении Surfer 8. Оценку степени общей пространственной неоднородности проводили по параметрам вариограммы для моделей (экспоненциальная, Гаусса, сферическая) по соотношению нагет/порог (C₀/(C₀+C)) по следующей шкале: <0,25 – сильная; 0,25–0,75 – средняя; >0,75 – слабая пространственная корреляция изучаемых параметров (Cambardella et. all, 1994). Для степенной модели такая шкала, по всей видимости, не разработана.

Кросс-валидацию и расчет среднеквадратической ошибки RMSE (Root Mean Square Error) проводили в SAGA GIS методом «leave-one-out» по следующей формуле (Hengl, 2007):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \sum_{j=1}^l [\hat{z}(s_j) - z^*(s_j)]^2}$$

где $\hat{z}(s_j)$ – предсказанное значение; $z^*(s_j)$ – фактическое значение; l – количество точек проверки.

В том числе оценку точности геостатистического моделирования проводили с помощью расчета средней абсолютной относительной ошибки MAPE (Mean Absolute Percentage Error) по следующей формуле (Афанасьев, Цыпин, 2008):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_t - \bar{y}_t|}{y_t} \times 100$$

где y_t – фактическое значение; \bar{y}_t – прогнозное значение; n – объем проверочной выборки.

MAPE ошибка показывает, на сколько (в процентах) в среднем прогноз отклоняется от фактического значения. Интерпретация оценки точности прогноза на основе показателя MAPE представлена в следующей градации (Афанасьев, Цыпин, 2008): <10% – высокая; 10–20% – хорошая; 20–50% – удовлетворительная; >50% – неудовлетворительная точность прогнозирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статистический и геостатистический анализ данных. Оценка полученных данных по критерию Шапиро-Уилка до и после внесения агрохимикатов показала, что вероятностное распределение таких свойств как рН, содержание подвижного фосфора и обменного кальция не подчинялось закону нормального распределения Гаусса. Нормальное распределение в начале опыта изменилось на аномальное к концу опыта для содержания органического и труднорастворимого фосфора (табл. 2).

Таблица 2

Описательная статистика

Почвенные и растительные параметры	До внесения агрохимикатов (начало опыта), $n=24$			После внесения агрохимикатов (конец опыта), $n=24$		
	$M \pm s$ <i>Med; Q₁; Q₃</i> *	Тест Шапиро-Уилка **		$M \pm s$ <i>Med; Q₁; Q₃</i> *	Тест Шапиро-Уилка**	
		W	p		W	p
рН солевой вытяжки	$5,03 \pm 0,29$ 4,97; 4,88; 5,04	0,63	0,00	$5,18 \pm 0,65$ 5,04; 4,71; 5,24	0,78	0,00
Углерод органический, %	$2,36 \pm 0,11$	0,97	0,73	$2,45 \pm 0,12$	0,93	0,11
Азот нитратный, мг/кг	$20,95 \pm 5,39$	0,96	0,51	$2,73 \pm 0,64$	0,98	0,94
Фосфор общий, мг/кг	2002 ± 48	0,95	0,35	2061 ± 47	0,95	0,24
Фосфор трудно-растворимый, мг/кг	675 ± 51	0,95	0,34	$\frac{731 \pm 105}{708; 670; 764}$	0,84	0,00
Фосфор органический, мг/кг	1086 ± 60	0,96	0,65	$\frac{1089 \pm 73}{1107; 1060; 1126}$	0,88	0,00
Фосфор подвижный, мг/кг	$\frac{244 \pm 19}{247; 238; 257}$	0,73	0,00	$\frac{241 \pm 35}{251; 231; 267}$	0,88	0,01
Калий обменный, мг/кг	$104 \pm 6,8$	0,96	0,50	144 ± 36	0,92	0,07
Калий необменный, мг/кг	$\frac{1002 \pm 49}{993; 973; 1019}$	0,90	0,03	1002 ± 58	0,97	0,69
Кальций обменный, смоль(экв)/кг	$\frac{13,4 \pm 1,5}{13,0; 12,7; 13,3}$	0,54	0,00	$\frac{15,2 \pm 5,5}{13,4; 11,9; 14,2}$	0,65	0,00
Магний обменный, смоль(экв)/кг	$1,69 \pm 0,01$	0,97	0,78	$1,69 \pm 0,03$	0,96	0,56
Масса соцветий брокколи, г	–	–	–	592 ± 195	0,97	0,74

Примечание: $M \pm s$ – среднее арифметическое значение и стандартное отклонение, W – критерий Шапиро-Уилка, p – уровень значимости, * – значения медианы (Med), первого (Q_1 , 25%) и третьего (Q_3 , 75%) квартиля приведены только для данных с аномальным распределением (выделено серым цветом с $p < 0,05$), ** – без единиц измерения.

Согласно литературным данным (Hengl, 2007; Oliver, 2010), одним из условий применения методов геостатистики является нормальное вероятностное распределение данных. Данные о свойствах почв с аномальным распределением привели к нормальному с помощью логарифмирования для дальнейшего построения вариограмм и получения параметров модели. Экспериментальные данные для большинства свойств почв имели одинаковое поведение для различных направлений, т.е. характеризовались изотропным поведением пространственной связи (рис. 3, 4). Подходящий тип модели, порог и нагет (эффект самородка) были определены по всенаправленным вариограммам. Подгонку теоретической модели к экспериментальной осуществляли с помощью опции «Best fit found», т.е. нахождение наиболее подходящих параметров. На рисунках 3 и 4 показано, что тип модели для многих свойств почв изменился к концу опыта. Кросс-валидация и сравнение значений RMSE «leave-one-out» моделей со стандартным отклонением изучаемых параметров показали, что у большинства моделей RMSE больше половины стандартного отклонения или равно ему (табл. 2, 3). Согласно исследованиям (Singh et al., 2004), близкие к нулю значения RMSE указывают на идеальное соответствие модели фактическим данным. Значение RMSE меньше половины стандартного отклонения указывает на высокую точность прогнозирования. В процитированном выше исследовании не говорится о том, какого качества будет модель если RMSE равно стандартному отклонению или больше его. Таким образом, сделать вывод относительно точности моделей на основе полученных в этом исследовании значений RMSE непросто, или этот показатель неверно интерпретируется, так как визуальный осмотр составленных карт (приведены ниже) показывает хорошее соответствие интерполированных значений фактическим данным.

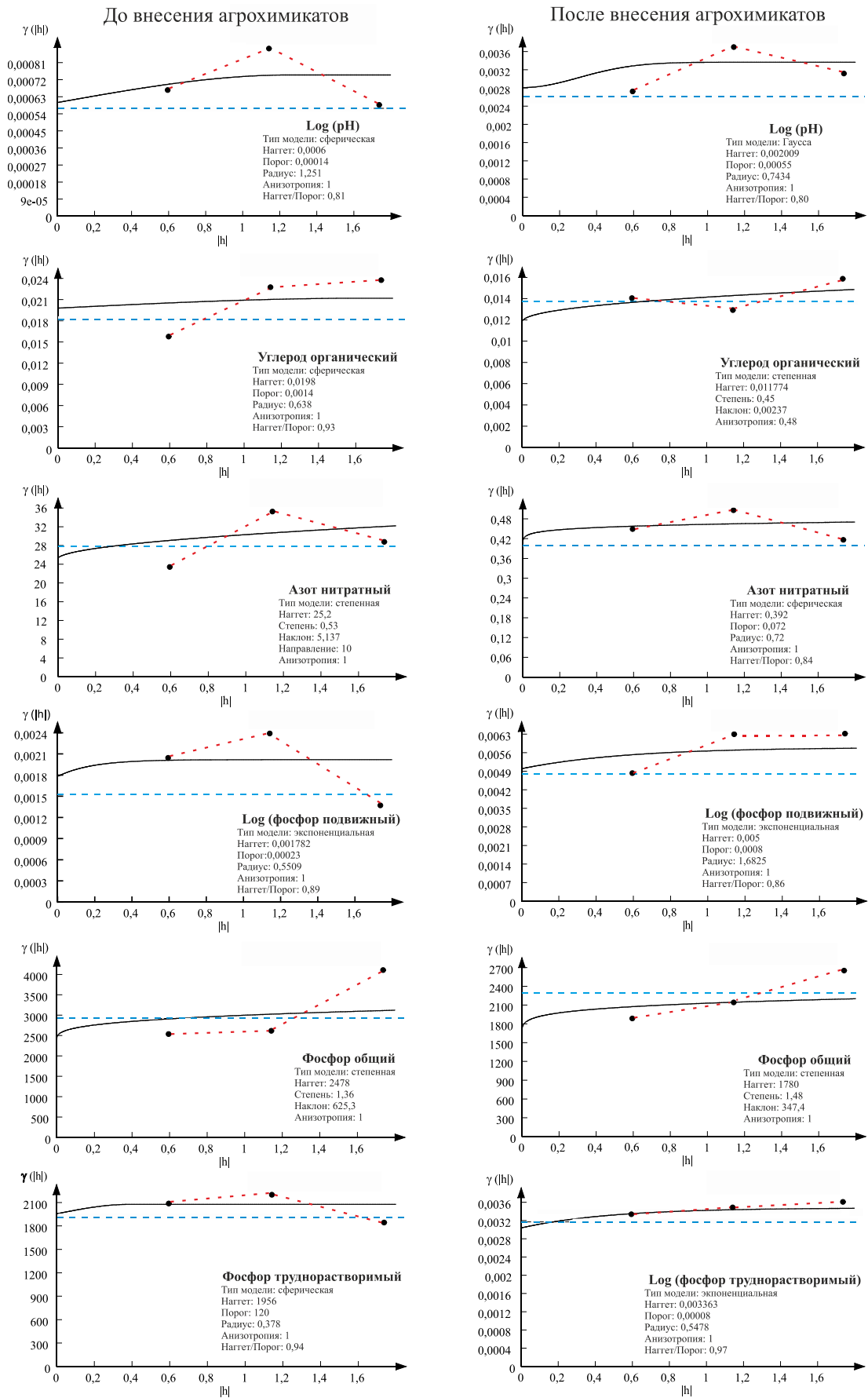


Рисунок 3. Вариограммы для почвенных свойств. Примечание: $\gamma(h)$ – полудисперсия, $|h|$ – расстояние, м; экспериментальные данные (красная пунктирная линия с парами точек) и теоретическая модель (черная линия), голубой пунктирной линией обозначена дисперсия.

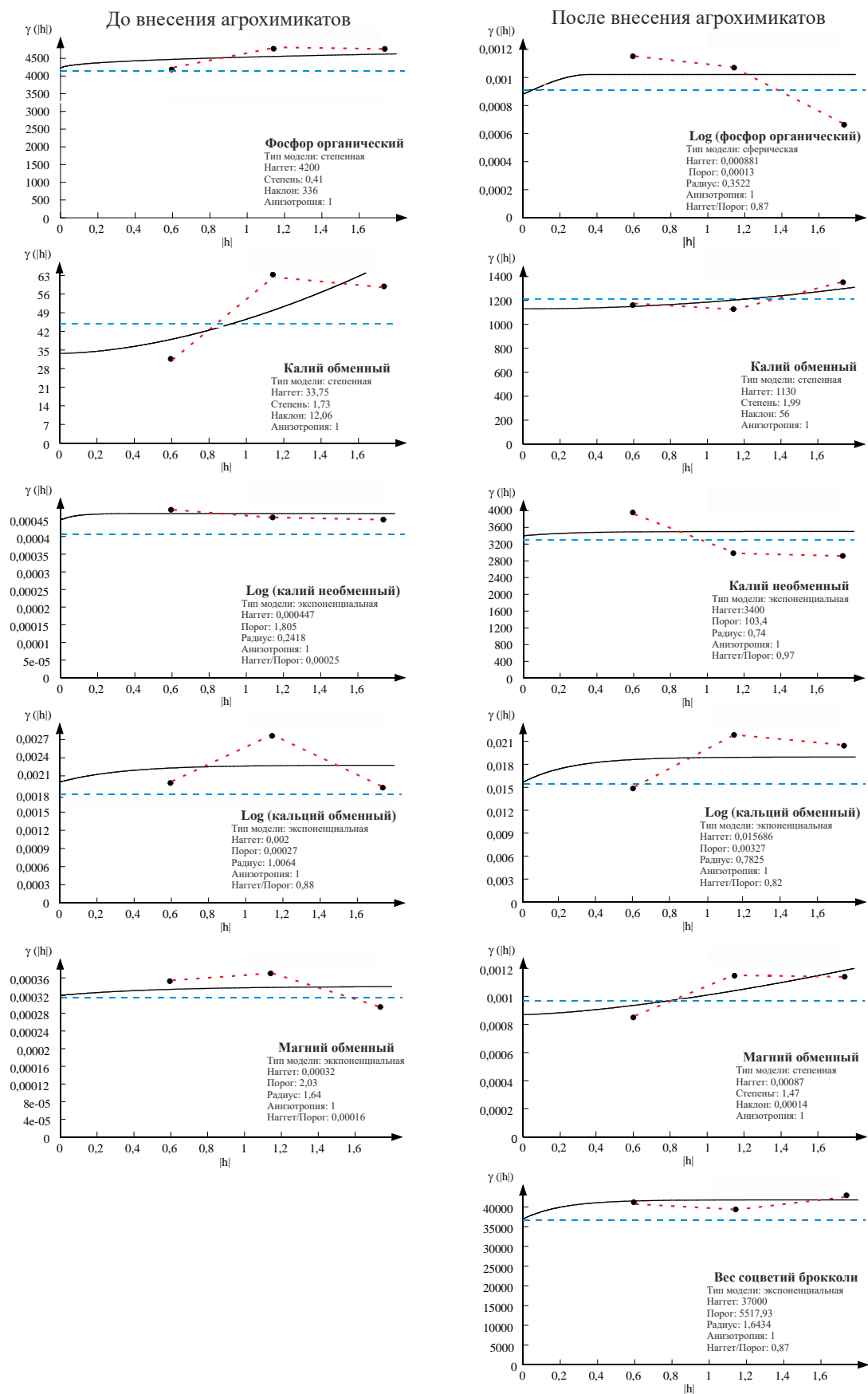


Рисунок 4. Вариограммы для почвенных свойств и веса соцветий брокколи. Примечание: $\gamma(|h|)$ – полудисперсия, $|h|$ – расстояние, м; экспериментальные данные (красная пунктирная линия с парами точек) и теоретическая модель (черная линия), голубой пунктирной линией обозначена дисперсия.

В исследованиях (Hengl, 2007) показано, что только с помощью независимого (контрольного) набора данных можно рассчитать истинную точность прогнозирования (интерполирования). Несмотря на небольшой объем выборки, была предпринята попытка оценить точность пространственного моделирования методом «jack-knife» (т.е. в случайном порядке несколько наблюдений были изъяты из выборки). Из каждого варианта опыта было изъято по одному наблюдению (до и после применения агрохимикатов). Расчеты показали для большинства изучаемых параметров значения RMSE «jack-knife» меньше половины стандартных отклонений и они ниже по сравнению с RMSE «leave-one-out», что свидетельствует о высокой точности интерполирования (табл. 2, 3). Некоторые исследователи (Ali, Abustan, 2014) считают, что RMSE нелогичный, неоднозначный или неверно интерпретируемый параметр для того, чтобы делать выводы относительно качества моделей. Поэтому дополнительно был произведен расчет такого показателя как средняя абсолютная относительная ошибка MAPE (Mean Absolute Percentage Error), результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3

Оценка точности геостатистического моделирования

Почвенные и растительные параметры	До внесения агрохимикатов (начало опыта)			После внесения агрохимикатов (конец опыта)		
	RMSE «leaf-on-out»	RMSE «jack-knife»	MAPE «jack-knife», %	RMSE «leaf-on-out»	RMSE «jack-knife»	MAPE «jack-knife», %
рН солевой	0,29	0,15	2,3	0,65	0,32	5,0
Углерод органический	0,1	0,12	4,1	0,19	0,13	4,2
Азот нитратный	4,78	5,4	19,2	0,69	0,49	16,6
Фосфор общий	58,3	46,8	1,9	37,8	41,1	1,5
Фосфор труднорастворимый	51,5	52,1	5,1	155,8	137,3	8,3
Фосфор органический	83,1	52,3	3,7	92,6	97,5	6,2
Фосфор подвижный	20,7	18,8	5,2	38,3	12,9	4,3
Калий обменный	4,8	4,0	2,9	36,2	11,4	7,3
Калий необменный	51,8	28,8	2,1	59,8	71,8	5,6
Кальций обменный	1,54	0,7	3,2	5,27	2,2	11,2
Магний обменный	0,018	0,02	1,2	0,03	0,03	1,2
Масса соцветий брокколи	–	–	–	203,3	225,0	36,6

Примечание. RMSE представлен в единицах измерения, которые приведены в табл. 2.

По значениям MAPE «jack-knife» можно сделать вывод о высокой точности прогнозирования для параметров, у которых MAPE < 10% и хорошей – MAPE от 10 до 20% (табл. 3). Для массы соцветий брокколи модель была удовлетворительного качества – MAPE от 20 до 50%. Таким образом, качество геостатистического моделирования почвенных и растительных параметров вполне приемлемое для этого исследования и визуальное отображение на картах (приведены ниже) соответствует фактическим данным.

Оценка степени общей пространственной неоднородности по соотношению нагет/порог ($C_0/(C_0+C)$) показала, что его значения для большинства почвенных свойств больше порога 0,75, следовательно, наблюдается слабая пространственная корреляция или слабая зависимость полудисперсии от расстояния между точками; по всей видимости, это связано с наличием стохастического поведения вариации в общей неоднородности изучаемых параметров (рис. 3, 4).

Пространственно-временная изменчивость рН-KCl почвы. Реакция среды солевой вытяжки почв перед применением агрохимикатов была кислой и слабокислой во всех вариантах опыта (рис. 5, А). Статистические сравнения показали отсутствие различий рН почвы между вариантами (рис. 5, А). По значениям рН после применения агрохимикатов почва практически всех вариантов отличалась друг от друга (рис. 5, Б). В вариантах 1, 4 и 6 произошло подщелачивание, а в вариантах 2, 3 и 5 – подкисление солевой вытяжки почв. Подщелачивание почв в первом контрольном варианте, по всей видимости, связано с поливом в период вегетации водой с нейтральным рН (рН = 7,4). В варианте 4 произошло значительное подщелачивание рН почвы после внесения доломитовой муки. Среднее значение рН почвы до внесения доломитовой муки было 4,9, после ее внесения составило 6,5. Внесение органо-минерального удобрения «Криалл», содержащего в своем составе золу, привело к подщелачиванию рН почвы.

Согласно шкале (Елисеева, Юзбашев, 2002), степень интенсивности вариации рН до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) и умеренная (CV от 10 до 25%) соответственно (рис. 5 А, Б). Коэффициент вариации рН почвы в конце опыта увеличился в два раза после внесения агрохимикатов по сравнению с тем, что было до внесения удобрений.

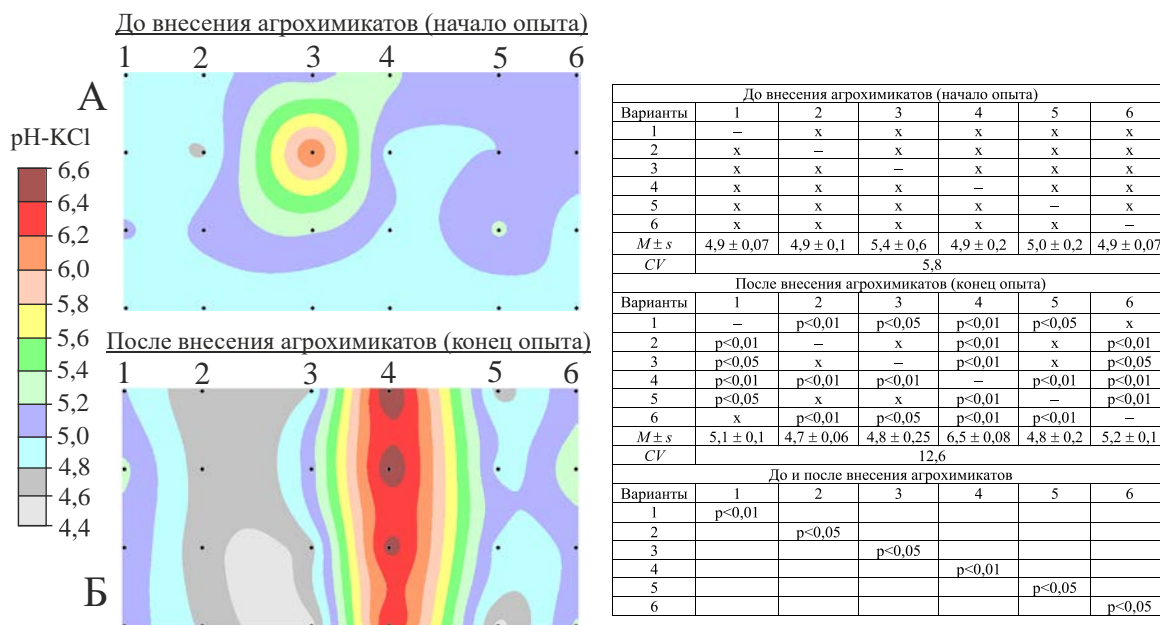


Рисунок 5. Картограммы реакции среды солевой вытяжки почв до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40). Условные обозначения к рис. 5-15: x – отличия не значимы; $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,05$ – различия значимы при указанной вероятности ошибки (p); $M \pm s$ – среднее арифметическое значение и стандартное отклонение; CV (%) – коэффициент вариации; точки на картограммах – расположение брокколи.

Пространственно-временная изменчивость содержания органического углерода в почве. Перед применением агрохимикатов содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почве разных вариантов опыта варьировало в диапазоне от 2,2 до 2,7% (рис. 6, А).

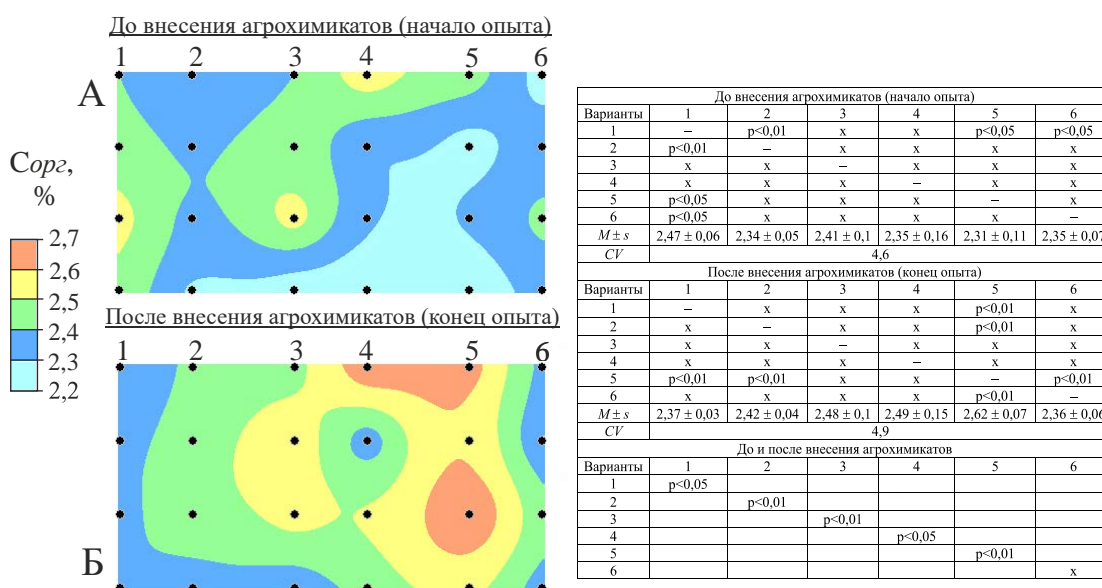


Рисунок 6. Картограммы содержания органического углерода в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Содержание $C_{орг}$ в почве варианта 1 было выше по сравнению со 2, 5 и 6 вариантами. В почве остальных вариантов опыта отличий по содержанию $C_{орг}$ не обнаружено.

Статистические сравнения показали, что после применения агрохимикатов содержание $C_{орг}$ в варианте 5 было выше, чем в вариантах 1, 2 и 6 (рис. 6, Б). В почве других вариантов опыта различий в содержании $C_{орг}$ не обнаружено (рис. 6, Б).

Установлены различия в содержании $C_{орг}$ в почве вариантов 1, 2, 3, 4 и 5 по отношению к соответствующим вариантам до внесения агрохимикатов: в варианте 1 его содержание уменьшилось на 4%, во 2, 3, 4 и 5 – увеличилось на 3–13%, с максимальным значением в варианте 5 (рис. 6, Б). Внесенные в почву аммиачная селитра и двойной суперфосфат были обогащены гуматом калия, по всей видимости, увеличение $C_{орг}$ в вариантах 2, 3, 4 и 5 связано с внесением в почву этого углеродсодержащего соединения, а в пятом варианте с дополнительным внесением сырой мульчи.

Степень интенсивности вариации содержания $C_{орг}$ до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) в обоих случаях (рис. 6, А, Б).

Пространственно-временная изменчивость содержания нитратного азота в почве. Перед применением агрохимикатов содержание нитратного азота в почве различных вариантов опыта варьировало в широком диапазоне от 10 до 30 мг/кг (рис. 7, А). Почва по обеспеченности нитратным азотом относилась к категории со средним (от 10 до 15 мг/кг) и высоким (> 15 мг/кг) его содержанием. Почва варианта 2 отличалась от 3 и 4 более высоким содержанием нитратного азота в 1,4 и 1,7 раза соответственно. В почве остальных вариантов опыта отличий по содержанию нитратного азота не установлено (рис. 7, А).

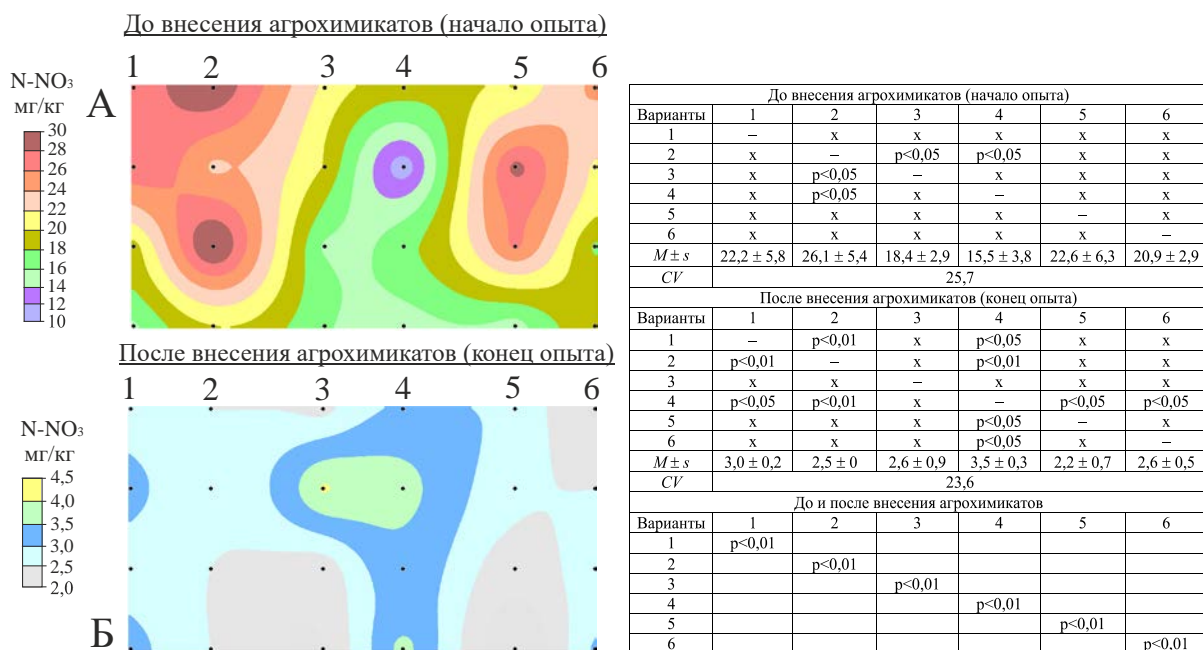


Рисунок 7. Карттограммы содержания нитратного азота в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

После внесения агрохимикатов почва контрольного варианта 1 отличалась от варианта 2 более высоким содержанием нитратного азота в 1,3 раза, а по сравнению с вариантом 4 – более низким в 1,2 раза. В варианте 4 содержание нитратного азота в почве было в 1,2–1,6 раза выше, чем во всех остальных вариантах, за исключением варианта 3, где различия между его содержанием в почве сравниваемых вариантов были не значимы (рис. 7, Б). Содержание нитратного азота в почве после уборки урожая снизилось в 7–10 раз относительно вариантов до внесения удобрений, что связано с выносом урожаем. Кроме этого, в осенний период происходит охлаждение почвы, которое приводит к угнетению микробиологической активности и снижению содержания нитратного азота в почве. Содержание нитратного азота в почве после внесения агрохимикатов и сбора урожая брокколи было низким.

Степень интенсивности вариации содержания нитратного азота до и после внесения агрохимикатов характеризуется как умеренная (CV от 10 до 25 %) в обоих случаях (рис. 7, А, Б).

Пространственно-временная изменчивость содержания общего, подвижного, труднодоступного и органического фосфора в почве. По содержанию подвижного фосфора почва различных вариантов опыта до внесения агрохимикатов не отличалась между собой, за исключением варианта 4, где наблюдалось более высокое его содержание по сравнению с вариантами 1 и 6 (рис. 8, А). Согласно разработанным градациям (Методические указания..., 2003), серая лесная почва во всех вариантах опытного участка относилась к группе с очень высоким (> 200 мг P₂O₅/кг) содержанием подвижного фосфора.

После применения агрохимикатов почва варианта 4 отличалась от всех остальных меньшим содержанием подвижного фосфора в 1,4–1,5 раза. В почве варианта 2 его содержание было в 1,1 раза выше, чем в почве варианта 6 (рис. 8, Б). Существенных различий в содержании подвижного фосфора в почве между вариантами с разными сроками отбора проб не выявлено, за исключением варианта 4, в котором внесение доломитовой муки привело к снижению его содержания в 1,4–1,5 раза. Среднее содержание подвижного фосфора до внесения доломитовой муки составляло 255 мг P₂O₅ /кг, а после внесения – 176 мг P₂O₅ /кг. Почва до внесения доломитовой муки относилась к группе с очень высоким содержанием подвижного фосфора, а после ее внесения была отнесена к группе с более низким, но также высоким содержанием. Наблюдаемый эффект связан с иммобилизацией фосфора в труднорастворимых фосфатах, содержание которых в почве варианта 4 увеличилось на 22% (рис. 9, Б). Таким образом, под действием кальция и магния, содержащихся в доломитовой муке, происходит химическая иммобилизация фосфора и последующая трансформация фосфатного состояния почв.

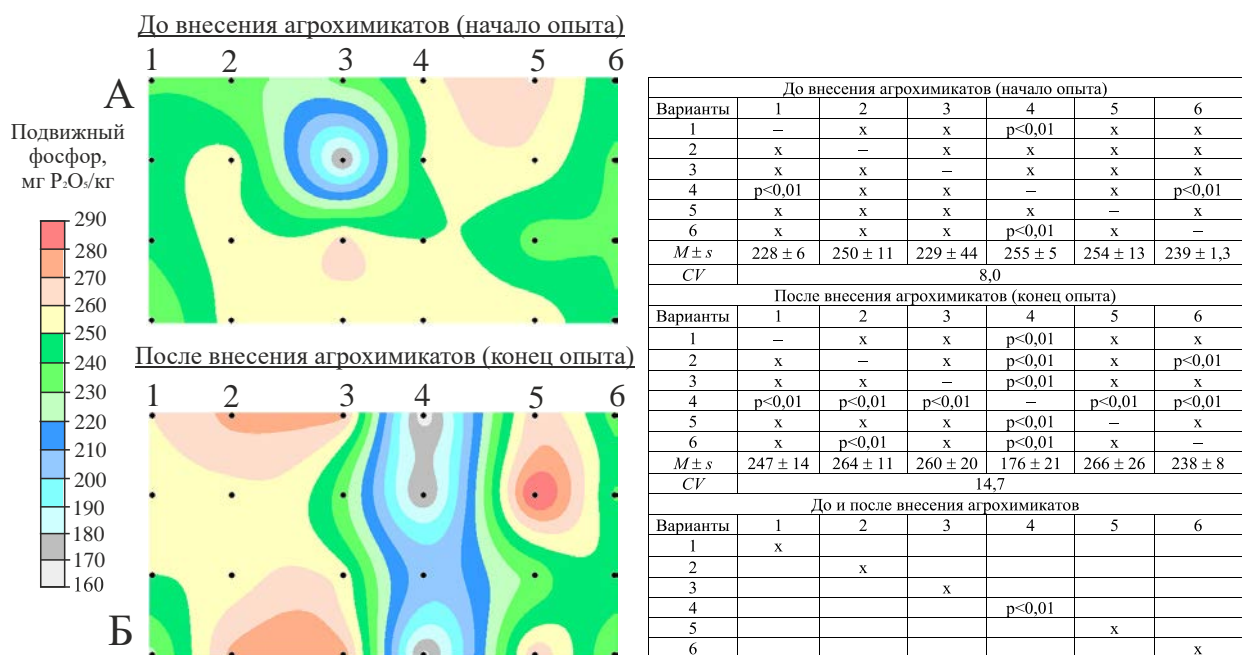


Рисунок 8. Картограммы содержания подвижного фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

С одной стороны, химическое связывание фосфат-иона кальцием, магнием и органическими соединениями предотвращает его вымывание из почвы, что благоприятно отражается на фосфатном состоянии почв, а, с другой, внесение кальцийсодержащих соединений снижает пул его подвижных форм и может вызвать дефицит элемента при выращивании культур на почвах с его низким содержанием. Изучаемая почва не относилась к категории с низким содержанием подвижного фосфора и в соцветиях брокколи, выращенной с внесением доломита на фоне NPK-удобрений, не отмечался дефицит фосфора. Напротив, его содержание соответствовало оптимуму – 0,62%, и по сравнению с другими вариантами опыта было максимальным (табл. 4). Следовательно, такой нежелательный процесс как химическая иммобилизация фосфора в почвах с

высоким содержанием его подвижных форм не оказывает отрицательного влияния на поглощение фосфора растениями.

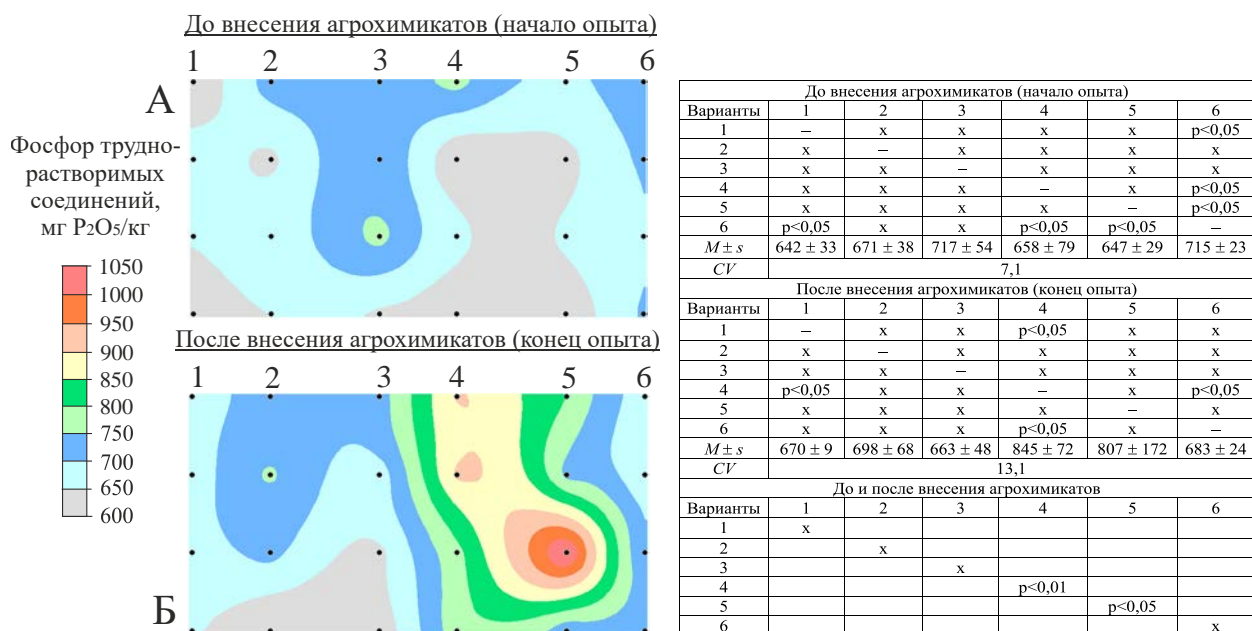


Рисунок 9. Картограммы содержания труднорастворимых соединений фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Анализ динамики содержания общего фосфора в почве до и после внесения фосфорных удобрений показал, что в почве вариантов 2, 3, 4, 5 и 6 наблюдалось увеличение его содержания на 2,6–3,6% (рис. 10 А, Б).

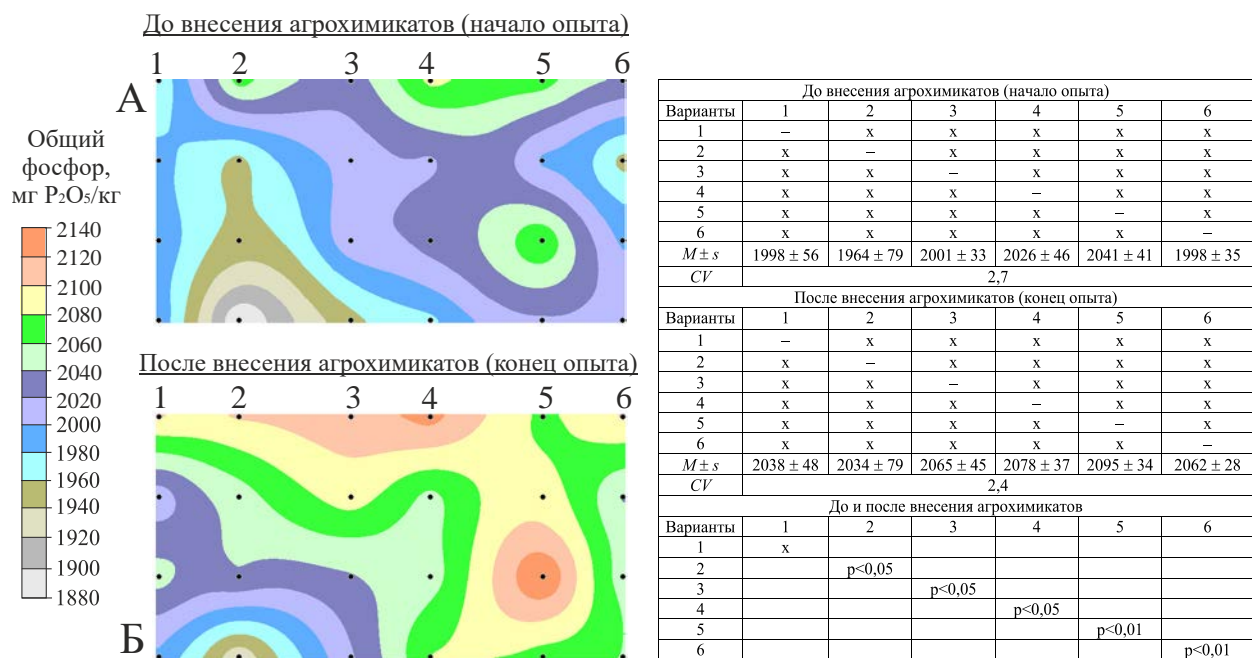


Рисунок 10. Картограммы содержания общего фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Содержание органического фосфора увеличилось в почве вариантов 3 и 6 в среднем на 8%, что связано с влиянием органических кислот, внесенных дополнительно с удобрениями, и способствующих иммобилизации фосфора в органоинеральных соединениях (рис. 11, А, Б).

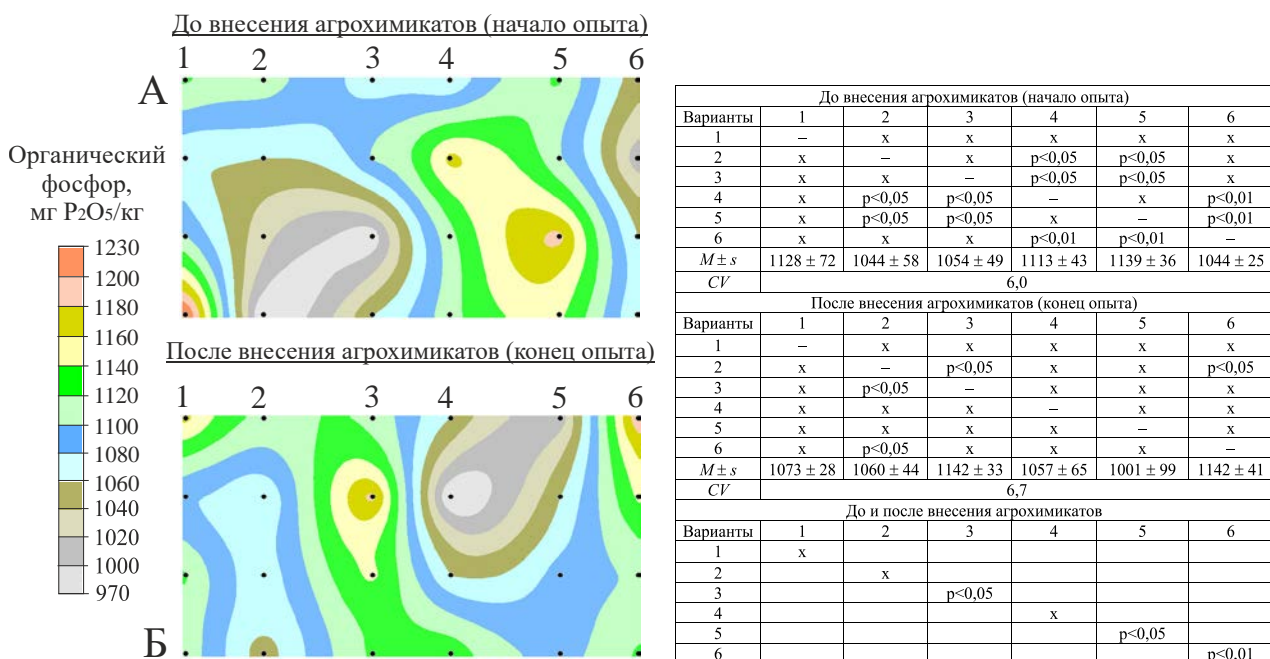


Рисунок 11. Картограммы содержания органического фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Таким образом, не использованный растениями фосфор активно иммобилизуется в результате химического взаимодействия веществ (фосфорных удобрений и органических кислот), внесенных в почву. Органофосфаты относятся к ближайшим резервам, пополняющим пул подвижного фосфора после их минерализации, поэтому увеличение их содержания благоприятно сказывается на фосфатном состоянии почв и предотвращает его вымывание фильтрационными водами в нижележащие горизонты. В почве варианта 5 содержание органического фосфора снизилось на 12% по отношению к соответствующему варианту до внесения агрохимикатов и сырой мульчи (рис. 11, Б). В варианте 2 такого эффекта не наблюдали, следовательно, соединения, образовавшиеся в почве 5-го варианта после разложения сырой мульчи способствовали переводу некоторой части органического фосфора в труднорастворимые формы, содержание которых в свою очередь увеличилось на 20% (рис. 11, Б).

Степень интенсивности вариации содержания общего, подвижного, труднорастворимого и органического фосфора до внесения агрохимикатов была слабой ($CV < 10\%$). После внесения агрохимикатов этот показатель для подвижного и труднорастворимого фосфора увеличился более чем в 2 раза и стал умеренным (рис. 8, 9), а для содержания общего фосфора после внесения агрохимикатов существенно не изменился (рис. 10).

Пространственно-временная изменчивость содержания обменного и необменного калия в почве. Различия по содержанию обменного калия в почве различных вариантов опыта до внесения агрохимикатов были не существенны (рис. 12, А). Согласно разработанным грациям (Методические указания..., 2003), агросерая почва всех вариантов опытного участка относилась к группе со средним (101-150 мг K₂O/кг) содержанием обменного калия. После применения агрохимикатов содержание обменного калия в вариантах 2, 3, 4, 5 увеличилось на 34–88% относительно соответствующих вариантов до применения агрохимикатов. Почва в вариантах 2, 3, 4, 5 после внесения калийных удобрений и сбора урожая отнесена к группе с повышенным (151–200 мг K₂O/кг) содержанием обменного калия. Среди этих вариантов почва варианта 3 характеризовалась наименьшим содержанием обменного калия (рис. 12, Б).

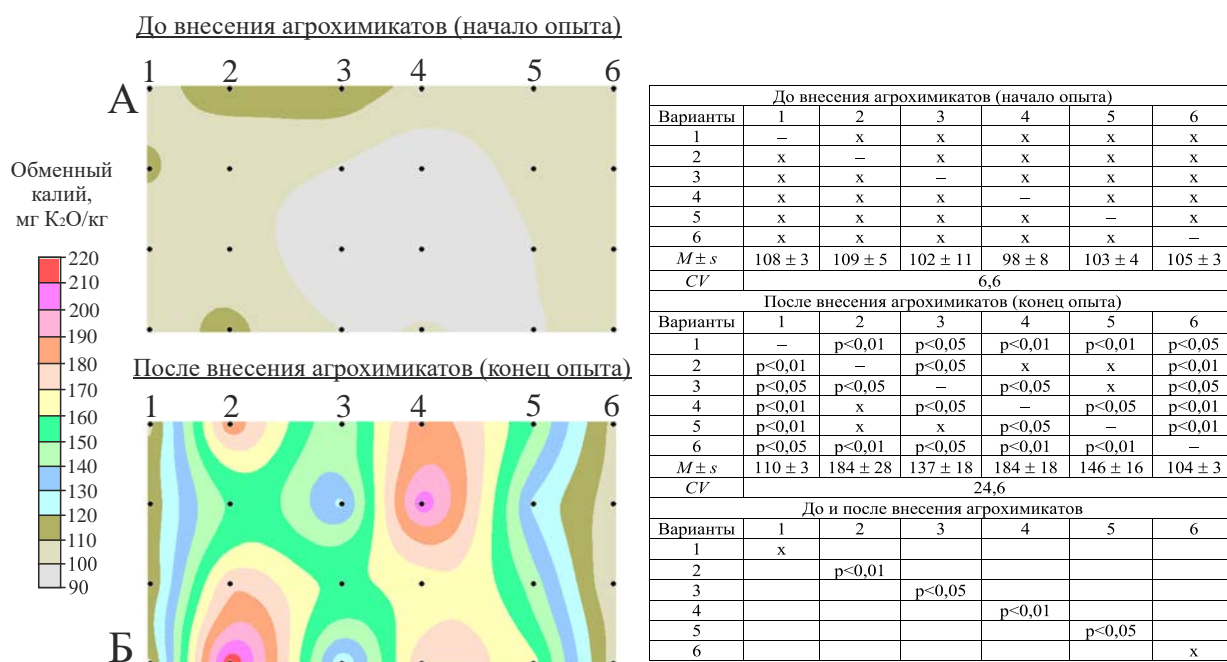


Рисунок 12. Картограммы содержания обменного калия в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Внесение калийных удобрений не способствовало увеличению содержания необменного калия в почве (рис. 13, А, Б).

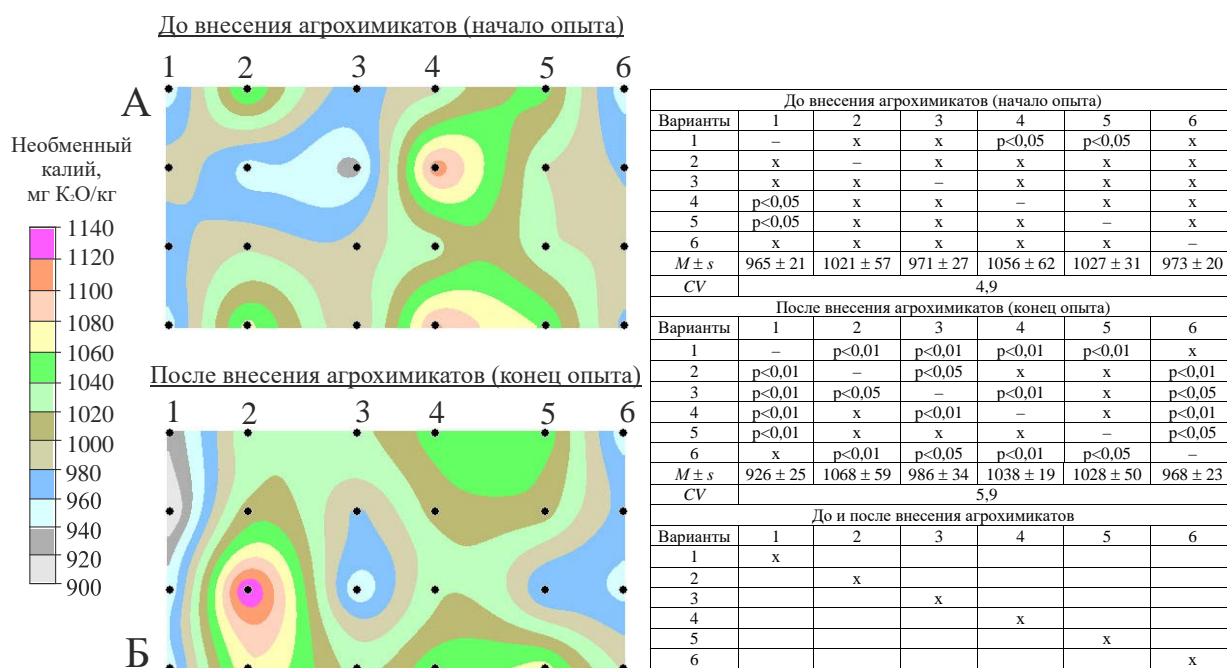


Рисунок 13. Картограммы содержания необменного калия в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Степень интенсивности вариации содержания обменного калия до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) и умеренная (CV от 10 до 25 %), а необменного калия – как слабая ($CV < 10\%$) в обоих случаях (рис. 12, 13).

Пространственно-временная изменчивость содержания обменного кальция в почве.

Статистические сравнения перед применением агрохимикатов показали, что различия в содержании обменного кальция в почве всех вариантов незначительны (рис. 14 А). Согласно разработанной градации (Методические указания..., 2003), почва опытного участка относилась к группе с повышенным содержанием обменного кальция (10,1-15,0 смоль (+)/кг).

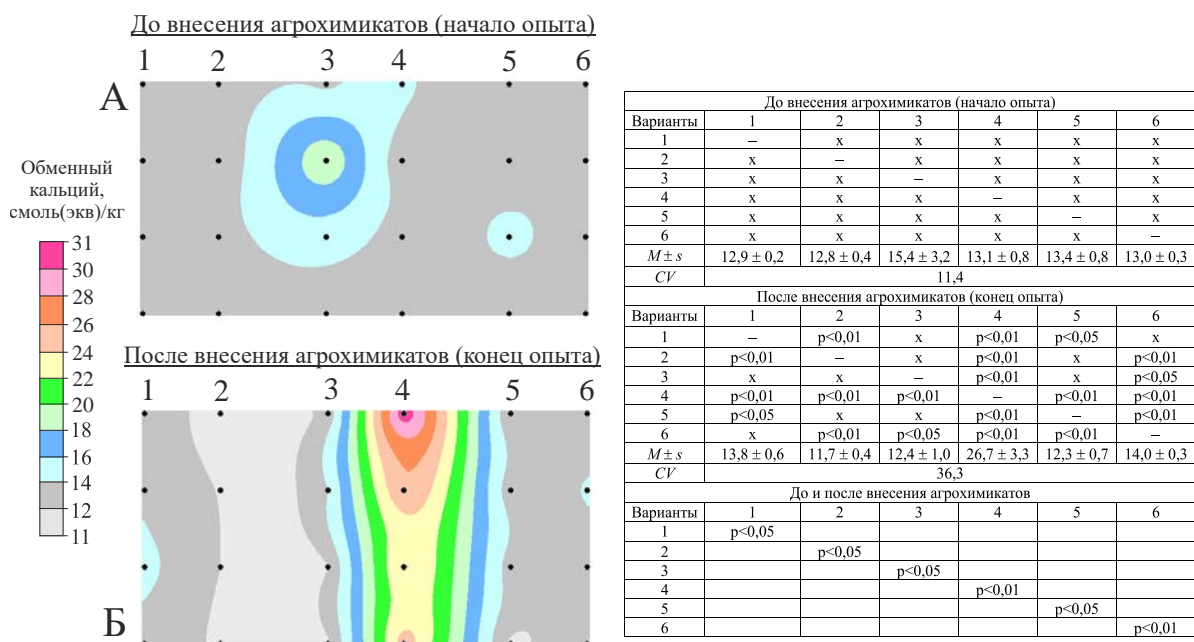


Рисунок 14. Картограммы содержания обменного кальция в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

После уборки урожая брокколи в почве вариантов 1 и 6 содержание обменного кальция увеличилось на 7%, что связано с поступлением кальция с поливной водой, при этом произошло подщелачивание почвы (рис. 14, А, Б; рис. 5 Б). Внесение фосфорных удобрений в почву вариантов 2, 3 и 5 привело к снижению содержания обменного кальция на 7–24%, которое связано с его иммобилизацией в труднорастворимых фосфатах кальция.

Внесение доломитовой муки в почву варианта 4 способствовало увеличению содержания обменного кальция в два раза относительно варианта до ее внесения (рис. 14, Б). Почва варианта 4 до внесения доломитовой муки относилась к группе с повышенным (10,1–15,0 смоль(+)/кг) содержанием обменного кальция, а после ее внесения отнесена к группе с очень высоким (>20 смоль(+)/кг) его содержанием.

Степень интенсивности вариации содержания обменного кальция до и после внесения агрохимикатов характеризовалась как умеренная и сильная, с увеличением после внесения агрохимикатов в 3 раза (рис. 14).

Пространственно-временная изменчивость содержания обменного магния в почве.

Согласно разработанным градациям (Методические указания..., 2003), агросерая почва опытного участка перед применением агрохимикатов относилась к группе со средним (1,1–2,0 смоль(экв)/кг) содержанием обменного магния. Статистические сравнения показали отсутствие различий в содержании обменного магния в почве всех вариантов (рис. 15, А).

Внесение агрохимикатов не оказало значительного влияния на изменение содержания обменного магния в почве (рис. 15 Б). Внесенные в почву калий хлористый, магниевый и доломит содержали в своем составе магний, однако в вариантах 2, 3, 4, 5 увеличения содержания обменного магния в почве не наблюдалось. По всей видимости, это связано с иммобилизацией магния в труднорастворимых фосфатах и поглощением растениями брокколи. Однако, явного увеличения содержания магния в соцветиях брокколи этих вариантов не наблюдалось (табл. 4).

Степень интенсивности вариации содержания обменного магния до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) (рис. 15, А, Б).

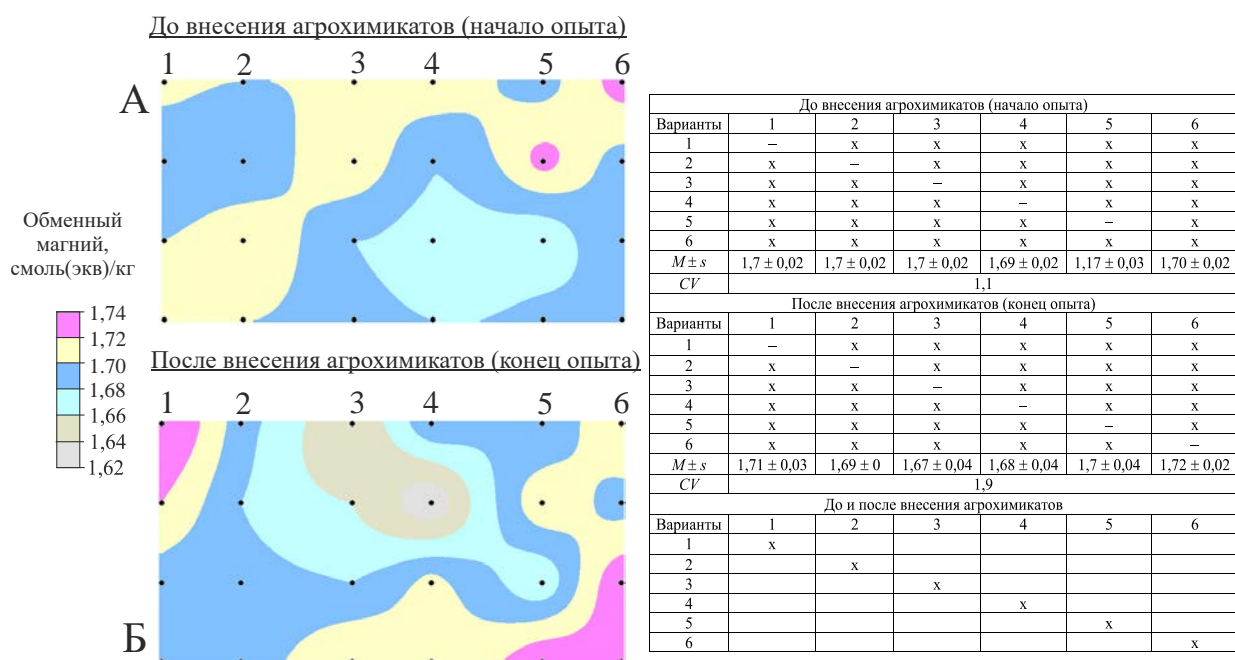


Рисунок 15. Картограммы содержания обменного магния в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Пространственная изменчивость массы соцветий брокколи и ее сравнительная оценка в вариантах опыта. Визуальное сравнение показало, что как в контрольном варианте, так и в вариантах с внесением удобрений встречаются соцветия с небольшим диаметром (рис. 16, 17). Брокколи характеризуется неравномерным созреванием соцветий в связи с генотипическими особенностями, поэтому соцветия убирали в разные сроки, по достижении ими максимальной зрелости (рис. 18).



Рисунок 16. Внешний вид брокколи в период начала уборки урожая (17.08.2016 г.).

Внесение агрохимикатов способствовало увеличению массы соцветий на 80–83% во втором и третьем вариантах относительно контрольного варианта без удобрений, с максимальным

значением в варианте 2 (табл. 4). В вариантах 4, 5 и 6 различия с контролем были не достоверны. Отличия по средней массе соцветий брокколи в вариантах 2, 3, 4, 5 и 6 с внесением агрохимикатов были не существенны (табл. 4). Степень интенсивности вариации массы соцветий брокколи составила 33% и характеризовалась как сильная ($CV > 25\%$).



Рисунок 17. Диаметр соцветий брокколи на начало уборки (17.08.2016 г.).

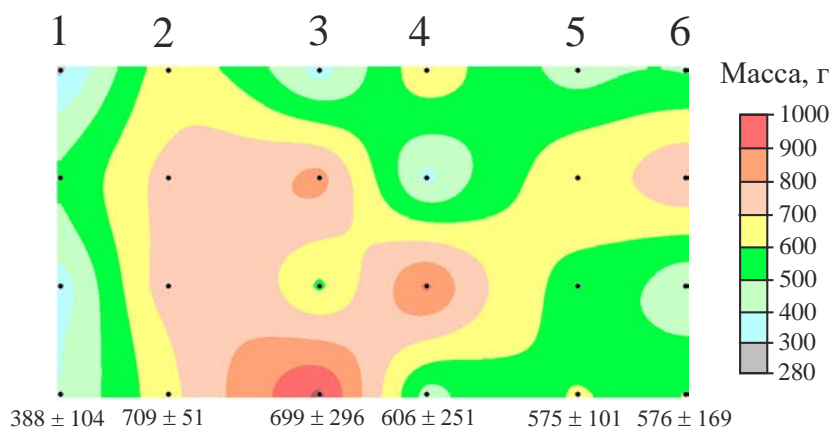


Рисунок 18. Картограмма массы соцветий брокколи. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Содержание азота, фосфора и калия в соцветиях брокколи было оптимальным во всех вариантах опыта (табл. 4). Отмечено большее содержание общего азота в соцветиях брокколи в варианте 4. По всей видимости, это связано с увеличением поглощения этого элемента растениями при нейтральной реакции среды почвы, изменение которой произошло благодаря внесению доломитовой муки. Известно, что брокколи по содержанию незаменимых аминокислот в белке не уступает говядине, поэтому такой приём, как внесение доломита совместно с азотными удобрениями, позволит увеличить содержание азота и соответственно незаменимых аминокислот

в белке брокколи и повысить питательную ценность этого овоща (табл. 4). В вариантах 5 и 6 наблюдалось снижение содержания общего азота в соцветиях по отношению ко всем вариантам опыта, а в варианте 3 отличия с контролем по этому показателю были не существенны.

Таблица 4

Масса соцветий брокколи (среднее \pm стандартное отклонение) и их химический состав

Варианты	Средняя масса основных соцветий, г	Средняя масса боковых соцветий*, г	Среднее содержание, в % на абс. сухое вещество				
			N	P	K	Ca	Mg
1. Контроль	388 ^a \pm 104	54 ^a \pm 58	3,89 ^a	0,56 ^a	2,69 ^a	0,28 ^a	0,17 ^a
2. Фон (N100P60K160)	709 ^b \pm 51	56 ^a \pm 56	3,99 ^b	0,54 ^b	2,86 ^b	0,29 ^a	0,19 ^b
3. Фон+янтарная к-та	699 ^b \pm 296	136 ^a \pm 129	3,88 ^a	0,58 ^c	2,93 ^c	0,24 ^b	0,18 ^{ab}
4. Фон+доломит	606 ^{ab} \pm 251	88 ^a \pm 49	4,02 ^c	0,62 ^d	2,97 ^d	0,24 ^b	0,19 ^b
5. Фон+мульча	575 ^{ab} \pm 100	110 ^a \pm 82	3,72 ^d	0,60 ^e	3,04 ^e	0,25 ^b	0,18 ^{ab}
6. ОМУ «Криалл»	576 ^{ab} \pm 168	39 ^a \pm 44	3,84 ^c	0,60 ^e	2,93 ^c	0,28 ^a	0,17 ^a
НСР _{0,05}	273	108	0,012	0,013	0,018	0,012	0,012

Примечание: *боковые соцветия формируются после срезки основных соцветий; средние значения, за которыми следует одна и та же буква в столбце и для одного и того же свойства, существенно не различаются при $p \leq 0,05$.

По содержанию фосфора и калия в соцветиях различия достоверны во всех вариантах опыта (табл. 4). Наибольшее содержание фосфора в соцветиях наблюдалось в варианте 4, а калия в варианте 5. Содержание кальция в соцветиях брокколи было оптимальным во всех вариантах. Однако в вариантах 3, 4 и 5 выявлено существенное снижение содержания этого элемента в соцветиях брокколи по отношению к контролю (табл. 4). Содержание магния в соцветиях брокколи достоверно было выше в вариантах 2 и 4. Согласно разработанным грациям (Агрохимические методы..., 1975; Kalra, 1998), содержание элементов (N, P, K, Ca, Mg) в соцветиях было оптимальным во всех вариантах опыта.

Изучение корреляционных матриц показало, что зависимости между весом соцветий брокколи и почвенными свойствами, определенными до и после внесения агрохимикатов, были незначимы (табл. 5, 6).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции ($p < 0,05$) Спирмена (до внесения агрохимикатов, начало опыта)

Почвенные и растительные параметры	pH	C	N-NO ₃	P ₂ O ₅ подв.	P ₂ O ₅ общ.	P ₂ O ₅ орг.	P ₂ O ₅ стр.-раств.	K ₂ Oобщ.	K ₂ Oнеобщ.	Саобщ.	Mgобщ.	Вес соцветий
pH	–	0,52	x	x	0,48	x	0,71	x	x	0,91	x	x
C	0,52	–	x	x	x	x	0,46	x	-0,45	0,54	x	x
N-NO ₃	x	x	–	x	x	x	x	0,50	x	x	x	x
P ₂ O ₅ подв.	x	x	x	–	x	x	x	x	0,47	x	x	x
P ₂ O ₅ общ.	0,48	x	x	x	–	0,43	0,42	x	x	0,42	x	x
P ₂ O ₅ орг.	x	x	x	x	0,43	–	-0,51	x	x	x	x	x
P ₂ O ₅ стр.-раств.	0,71	0,46	x	x	0,42	-0,51	–	x	x	0,60	x	x
K ₂ Oобщ.	x	x	0,50	x	x	x	x	–	x	x	x	x
K ₂ Oнеобщ.	x	-0,45	x	0,47	x	x	x	x	–	-0,28	x	x
Саобщ.	0,91	0,54	x	x	0,42	x	0,60	x	x	–	x	x
Mgобщ.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–	x
Вес соцветий	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–

Примечание для табл. 5 и 6. x – корреляция не достигает уровня статистической значимости.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции ($p < 0,05$) Спирмена (после внесения агрохимикатов, конец опыта)

Почвенные и растительные параметры	pH	C	N-NO ₃	P ₂ O ₅ подв.	P ₂ O ₅ общ.	P ₂ O ₅ орг.	P ₂ O ₅ тр.-раств.	K ₂ Oобщ.	K ₂ Oнеобм.	Саобщ.	Mgобщ.	Вес соцветий
pH	–	x	0,70	-0,80	x	x	x	x	x	0,97	x	x
C	x	–	x	x	0,44	x	0,51	x	x	x	x	x
N-NO ₃	0,70	x	–	-0,61	x	x	x	x	x	0,71	x	x
P ₂ O ₅ подв.	-0,80	x	-0,61	–	x	x	x	x	x	-0,83	x	x
P ₂ O ₅ общ.	x	0,44	x	x	–	x	0,60	x	x	x	x	x
P ₂ O ₅ орг.	x	x	x	x	x	–	-0,60	-0,53	-0,50	x	x	x
P ₂ O ₅ тр.-раств.	x	0,51	x	x	0,60	-0,60	–	0,42	0,43	x	x	x
K ₂ Oобщ.	x	x	x	x	x	-0,53	0,42	–	0,71	x	x	x
K ₂ Oнеобм.	x	x	x	x	x	-0,50	0,43	0,71	–	x	x	x
Саобщ.	0,97	x	0,71	-0,83	x	x	x	x	x	–	x	x
Mgобщ.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–	x
Вес соцветий	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–

Таким образом, можно сделать вывод о ключевой роли генотипических особенностей брокколи в наращивании массы соцветий брокколи и применение агрохимикатов не способствовало выравниванию этого показателя.

Экономический эффект от применения агрохимикатов. Расчет окупаемости агрохимикатов показал эффективность минеральных удобрений во всех вариантах опыта (табл. 7).

Таблица 7

Окупаемость NPK удобрений по вариантам*

Варианты опыта	Урожайность брокколи, т/га	Прибавка, т/га	Затраты на средства химизации	Стоимость всей продукции	Доход от применения NPK удобрений	Окупаемость 1 кг д.в. NPK удобрений прибавкой урожая, кг	Окупаемость 1 кг физ. веса NPK удобрений прибавкой урожая, кг
			тыс. руб./га				
1. Контроль	15,5	–	–	1240	–	–	–
2. Фон N100P60K160	28,4	12,9	16,1	2272	1032	40,3	18,7
3. Фон+янтарная к-та	27,9	12,4	17,3	2232	992	38,8	17,9
4. Фон+доломит	24,3	8,8	17,5	1944	704	27,5	12,7
5. Фон+мульча	22,9	7,4	18,1	1832	592	23,1	10,7
6. ОМУ «Криалл»	23,1	7,6	60,0	1848	608	76	6,3

Примечание. * Затраты на средства химизации рассчитывались при стоимости 1 кг удобрений (руб.): аммиачная селитра – 22, двойной суперфосфат – 22, калий хлористый – 23, ОМУ «Криалл» – 50. Стоимость 1 кг брокколи – 80 руб.

Максимальная окупаемость 1 кг д.в. NPK удобрений прибавкой урожая составила 76 кг и получена в варианте ОМУ «Криалл», однако в этом варианте окупаемость по физическому весу удобрения была значительно ниже по сравнению с остальными вариантами, при этом затраты на покупку этого удобрения в 3–4 раза выше по сравнению с минеральными удобрениями. В вариантах 2–5 с применением минеральных удобрений максимальная окупаемость получена в варианте 2 и составила 40,3 кг. Таким образом, дополнительные средства (янтарная кислота,

доломит, мульча), внесенные совместно с удобрениями, не привели к значительному увеличению урожайности брокколи. Однако, следует учитывать то, что внесение минеральных удобрений приводит к подкислению реакции среды почв, которая, в свою очередь, может привести к их деградации и снижению доступности элементов питания для растений. Поэтому внесение кальцийсодержащих агрохимикатов (доломит, известь и т.д.) будет способствовать поддержанию плодородия почв при применении минеральных удобрений.

ВЫВОДЫ

1. Результаты исследований показали, что после внесения агрохимикатов степень интенсивности вариации для некоторых агрохимических свойств почвы изменяется существенно. Для рН, подвижных фосфора, калия и кальция коэффициенты вариации увеличились в два и более раза. Для подвижных фосфора и кальция увеличение коэффициентов вариации вызвано не только применением агрохимикатов, но и процессом связывания элементов в труднорастворимые соединения.

2. Установлено, что даже одногодичное применение агрохимикатов оказало существенное влияние на свойства почвы, которое проявилось в отрицательных (закисление, связывание фосфора, кальция и магния) и положительных (повышение содержания элементов питания) эффектах. Имобилизация элементов питания (фосфора, кальция, магния) в труднорастворимых соединениях в почве и последующее снижение содержания подвижных форм не оказали отрицательного влияния на элементный состав соцветий брокколи. Химическая иммобилизация приводит к закреплению элементов питания в верхнем горизонте почвы и предотвращает их выщелачивание талыми и дождевыми водами в нижние горизонты.

3. Внесение минеральных удобрений, обогащенных гуматом калия, привело к увеличению содержания органического углерода на 3–13% с максимальными значениями в вариантах с дополнительным внесением доломита и сырой мульчи.

4. Использование агрохимикатов повысило урожай и улучшило питательную ценность соцветий брокколи. В вариантах с внесением минеральных удобрений наибольшая окупаемость удобрений получена в варианте Фон – N100P60K160.

5. Не выявлено корреляции между весом соцветий брокколи и почвенными свойствами, определенными до и после внесения агрохимикатов, что свидетельствует о значительном влиянии на массу соцветий генотипических особенностей брокколи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение значимых проблем (совершенствование агротехнологий, экологизация производства, охрана окружающей среды, обеспечение продовольствием страны) должно осуществляться путем разработки научно-обоснованных подходов, которые позволят снизить затраты на покупку минеральных удобрений и устранить их отрицательное влияние на почву и в целом на окружающую среду.

В варианте с внесением органо-минерального удобрения «Криалл», в котором доза внесенного азота была равной 30 кг/га д.в., урожайность брокколи не отличалась от других вариантов с внесением минеральных удобрений, где доза была в 3 раза выше, поэтому дозу азотных минеральных удобрений при выращивании брокколи можно снизить в три раза для достижения максимального экономического эффекта от применения азотных удобрений и снижения отрицательного воздействия на окружающую среду.

Исследованная агросерая почва характеризовалась высоким содержанием подвижного фосфора, следовательно, фосфорные удобрения на такой почве можно было не применять. Многие земледельцы не принимают во внимание этот факт и используют рекомендации, которые часто не учитывают имеющееся плодородие почв. Такой подход приводит к нерациональному использованию удобрений, неоправданным финансовым затратам, загрязнению окружающей среды и изменению свойств почв не в лучшую сторону, например, подкислению реакции среды.

Дозу вносимых калийных удобрений при среднем (101–150 мг K₂O/кг) содержании калия в почве можно оставить без изменений – 160 кг/га д.в. Однако даже однократное применение калийных удобрений привело к существенному улучшению калийного статуса почвы (уровень обменного калия изменился со среднего до повышенного); следовательно, если ежегодное внесение калийных удобрений приведет к чрезмерно высокому уровню содержания обменного калия в почве, то дальнейшее применение калийных удобрений в высоких дозах будет приводить

к материальным издержкам и нарушению баланса питательных веществ в почве и минерального питания растений. Таким образом, если в хозяйствах вносятся высокие дозы удобрений, то диагностику почвы на содержание элементов питания необходимо проводить через каждые два года, чтобы принять правильные решения о дозах вносимых удобрений и скорректировать их при применении удобрений в следующем году.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность к.б.н. О.А. Савенкову за определение содержания общего азота в растительных образцах на CHN-анализаторе, Н.А. Галузо, Л.Д. Черепахиной и О.А. Писаревой за помощь в проведении лабораторно-аналитических работ.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа подготовлена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. *Атлас Новосибирской области* / Ред. коллегия: В.М. Кравцов, Р.П. Донукалова, В.И. Левакова, П.В. Ленин, Г.М. Позднякова. Москва: Роскартография, 2002. 56 с.
3. *Афанасьев В.Н., Цытин А.П.* Эконометрика в пакете STATISTICA: учебное пособие по выполнению лабораторных работ. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. 204 с.
4. *Вдовин В.В., Малолетко А.М.* История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Алтае-Саянская горная область. М.: Наука, 1969. С. 121–154.
5. *Елисеева И.И., Юзбашев М.М.* Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика, 2002. 480 с.
6. *Демьянов В.В., Савельева Е.А.* Геостатистика. Теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
7. *Инновационные технологии производства новых овощных культур в Ростовской области (салатные линии, пекинская капуста, брокколи, томат-черри, огурец корншонного типа, сахарная кукуруза)*. Научно-практические рекомендации. г. Ростов-на-Дону, 2012. 144 с.
8. *Красильников П.В.* Вариография дискретных почвенных свойств / В кн.: Экология и география почв. Петрозаводск: Изд-во Института биологии КарНЦ РАН, 2009. С. 10–30.
9. *Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения*. Под редакцией Л.М. Державина, Д.С. Булгакова М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 240 с.
10. *Мешалкина Ю.Л., Васнев И.И., Кузякова И.Ф., Романенков В.А.* Геостатистика в почвоведении и экологии. М.: РГАУ-МСХА, 2010. 95 с.
11. *Минеев В.Г.* Агрохимия: Учебник. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Издательство МГУ, Издательство «Колос», 2004. 720 с.
12. *Полевой определитель почв России*. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
13. *Потапова Д.А., Рендюк Т.Д., Дул В.Н., Чупарина Е.В.* Элементный состав капусты брокколи (*Brassica oleracea* L. Var. *Italica* Plenck) // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Биологические особенности лекарственных и ароматических растений и их роль в медицине», 2016. С. 404–406.
14. *Почвы совхоза «Железнодорожный» Новосибирского района Новосибирской области и рекомендации по их использованию*. Новосибирск: ЗАПСИБГИПРОЗЕМ, 1982. 54 с.
15. *Практикум по агрохимии*: Учеб. пособие. 2-е изд. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
16. *Фотев Ю.В., Артемьева А.М., Фатеев Д.А., Наумова Н.Б., Бугровская Г.А., Белоусова В.П., Кукушкина Т.А.* Особенности морфологии, биохимического состава и генетического полиморфизма китайской брокколи – новой для России овощной культуры // *Овощи России*. 2018. № 1(39). С. 12–19. DOI: [10.18619/2072-9146-2018-1-12-19](https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-1-12-19)
17. *Ali M., Abustan I.* A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*. 2014. Vol. 4. pp. 1–9. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>
18. *Arrouays D., McBratney A., Minasny B., Hempel J., Heuvelink G., MacMillan R., Hartemink A., Lagacherie P., McKenzie N.* The Global Soil Map project specifications. In: Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., Richer de Forges A., McBratney A.B. (ed) *Global Soil Map: Basis of the Global Spatial Soil Information System – Proceedings of the 1st Global Soil Map Conference*. Orleans, 2014. France, CRC Press, pp. 9–12.
19. *Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F., Konopka A.E.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994. Vol. 58. pp. 1501–1511.

20. Chen S., Martin M.P., Saby N.P., Walter C., Angers D.A., Arrouays D. Fine resolution map of top-and subsoil carbon sequestration potential in France // *Sci Total Environ.* 2018. Vol. 630. pp.389–400. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.02.209](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.209)
21. Gastal F., Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective // *J Exp Bot.* 2002. Vol. 53(370). pp. 789–799. DOI: [10.1093/jexbot/53.370.789](https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789)
22. Geng Y., Cao G., Wang L., Wang S. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution // *PLoS ONE.* 2019. No. 14(7). DOI: [10.1371/journal.pone.0219512](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219512)
23. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The Methods of Geomorphometry and Digital Soil Mapping for Assessing Spatial Variability in the Properties of Agrogray Soils on a Slope // *Eurasian Soil Science.* 2017. Vol. 50. pp. 20–29. DOI: [10.1134/S1064229317010082](https://doi.org/10.1134/S1064229317010082)
24. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indicative Capacity of NDVI in Predictive Mapping of the Properties of Plow Horizons of Soils on Slopes in the South of Western Siberia // *Eurasian Soil Science.* 2017. Vol. 50. pp. 1332–1343. DOI: [10.1134/S1064229317110060](https://doi.org/10.1134/S1064229317110060)
25. Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York. 1997.
26. Govers G., Merckx R., van Wesemael B., Van Oost K. Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. *SOIL.* 2017. Vol. 3 pp. 45–59. DOI: [10.5194/soil-3-45-2017](https://doi.org/10.5194/soil-3-45-2017)
27. Hengl T.A. Practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. Ispra (Italy): EC JRC, 2007. 165 p.
28. Holm S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure // *Scandinavian Journal of Statistics.* 1979. Vol. 6. No. 2. pp. 65–70.
29. Isaaks E. H., Srivastava R.M. Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989.
30. Kalra Y.P. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press, Boston. 1998. 287 p.
31. Lal R., Hall G.F., Miller F.P. Soil degradation: I. Basic processes // *Land Degrad Dev.* 1989. Vol. 1. pp. 51–69.
32. Oldeman L.R. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. 1988. No. 88/4, ISRIC, Wageningen.
33. Oliver M.A. Geostatistical applications for precision agriculture. London: Springer, 2010.
34. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B. Using deep learning for digital soil mapping. *SOIL.* 2019. Vol. 5. pp. 79–89. DOI: [10.5194/soil-5-79-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-79-2019)
35. Pannatier Y. Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D. New York: Springer-Verlag, 1996. 91 p.
36. Pimentel D. Soil erosion: A food and environmental threat // *Environ Dev Sustain.* 2006. Vol. 8. pp. 119–137. DOI: [10.1007/s10668-005-1262-8](https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8)
37. Razis A.F.A., Noor N.M. Cruciferous vegetables: Dietary phytochemicals for cancer prevention // *Asian Pac. J. Cancer Prev.* 2013. Vol. 14. pp. 1565–1570. DOI: [10.7314/apjcp.2013.14.3.1565](https://doi.org/10.7314/apjcp.2013.14.3.1565)
38. Singh J., Knapp H.V., Demissie M. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey Contract Report 2004-08, 2004. pp. 1–24. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/94220/ISWSCR2004-08.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
39. Soil organic carbon mapping Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 2018.
40. Soil Sampling and Methods of Analysis / Edited by M.R. Carter and E.G. Gregorich. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2008. 1224 p.
41. Suleymanov A., Abakumov E., Suleymanov R., Gabbasova I., Komissarov M. The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021. 10. 243. DOI: [10.3390/ijgi10040243](https://doi.org/10.3390/ijgi10040243)
42. Sumfleth K., Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators // *Ecol Indic.* 2008. Vol. 8 (5). pp. 485–501. DOI: [10.1016/j.ecolind.2007.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.05.005)
43. Verhoeven D.T., Goldbohm R.A., van Poppel G., Verhagen H., van den Brandt P.A. Epidemiological studies on Brassica vegetables and cancer risk // *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 1996. Vol. 5. pp. 733–748.

Поступила в редакцию 24.09.2021

Принята 02.12.2021

Опубликована 12.12.2021

Сведения об авторах:

Гопп Наталья Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск, Россия); gopp@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

EFFECT OF AGROCHEMICALS ON SPATIO-TEMPORAL CHANGES IN SOIL CHEMICAL PROPERTIES AND BROCCOLI YIELD

© 2021 N. V. Gopp 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: gopp@issa-siberia.ru

The aim of the study. *The aim of the study was to examine the effect of agrochemicals (mineral and organo-mineral fertilizers, plant growth regulators and ameliorants) on the spatio-temporal changes in the properties of agro-gray soil and broccoli yield using a cartographic approach.*

Methodology. *The field experiment was conducted in 2016 at the site located near the Bykovo village in the south-east of West Siberia (54°58'02.8" N; 83°5'21.45" E, Novosibirsk region). The objects of the study were the agro-gray soil (Luvic Retic Greyzem Phaeozem (Siltic, Aric)) and the medium-ripe broccoli cabbage variety "Linda". The experiment scheme included the following treatments: (1) Control (without fertilizers), (2) Background (N100P60K160), (3) Background + succinic acid, (4) Background + dolomite, (5) Background + mulch, (6) Organo-mineral fertilizer "Criall". Soil samples were analyzed for the content of organic carbon, nitrates, total, mineral and organic phosphorus, as well as its mobile form; exchangeable potassium, calcium and magnesium, and pH. The dried samples of broccoli inflorescences were analyzed for the total content of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium.*

Main results. *After applying agrochemicals and harvesting broccoli, the variation coefficients of pH, mobile phosphorus, potassium and calcium increased by two or more times. The use of agrochemicals increased the yield and improved the nutritional value of broccoli inflorescences. The treatments with mineral fertilization (2, 3, 4 and 5) the treatment 2 (Background N100P60K160) provided the greatest return. The application of the studied agrochemicals resulted in the negative (acidification, binding of phosphorus, calcium and magnesium) and positive (increase in the content of elements) effects. The immobilization of nutrients (phosphorus, calcium, magnesium) in poorly soluble soil compounds and the respective decrease in the content of the elements' mobile forms did not have a negative effect on the elemental composition of broccoli inflorescences. Thus, chemical immobilization, leading to the fixation of nutrients in the upper soil horizon, prevents their leaching by melt- and rainwater into the lower horizons.*

Key words: *geostatistics; kriging; dolomite; fertilizers; pH; nitrogen; phosphorus; potassium; calcium; magnesium*

How to cite: *Gopp N.V. Effect of agrochemicals on spatio-temporal changes in soil agrochemical properties and yield of broccoli // The Journal of Soils and Environment. 2021. 4(2). e157. doi: [10.31251/pos.v4i2.157](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.157) (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

1. *Agrochemical Methods of Soil Studies*. Moscow, Nauka, 1975, 656 p. (in Russian).
2. Kravtsov V.M., Donukalova R.P., Levakova V.I., Lepin P.V., Pozdnyakova G.M. Collection of maps of the Novosibirsk region. Moscow, Roskartografiya, 2002, 56 p. (in Russian)
3. Afanas'ev V.N., Tsybin A.P. Econometrics in STATISTICA Software: Manual for Laboratory Practicum. Orenburg State Univ., Orenburg, 2008. 204 p. (in Russian)
4. Vdovin V.V., Maloletko A.M. The history of the development of the relief of Siberia and the Russian Far East. Altai-Sayan mountainous region. Moscow, Nauka, 1969, pp. 121–154. (in Russian)
5. Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. General theory of statistics. Finance and Statistics, Moscow, 2002, 480 p. (in Russian)
6. Demyanov V.V., Savelyeva E.A. Geostatistics. Theory and practice. Moscow: Nauka, 2010. 327 p. (in Russian)
7. *Innovative technologies for the production of new vegetable crops in the Rostov region (salad, Peking cabbage, broccoli, cherry tomato, cucumber, sweet corn)*. Scientific and practical recommendations. Rostov-on-Don, 2012. 144 p.
8. Krasilnikov P.V. Variography of discrete soil properties / In: Ecology and Geography of Soils. Petrozavodsk: Publishing House of the Institute of Biology KarSC RAS, 2009. pp. 10–30.
9. *Guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural land*. Editors: Derzhavina L.M., Bulgakova D.S. Moscow, Rosinformagrotech, 2003, 240 p. (in Russian)
10. Meshalkina Yu.L., Vasenev I.I., Kuzyakova I.F., Romanenkov V.A. Geostatistics in soil science and ecology. Moscow: RGAU-ICCA, 2010. 95 p.
11. Mineev V.G. Practical course of agrochemistry. Moscow, MGU, 2001, 720 p. (in Russian)
12. *Field Guide for Correlation of Russian Soils*. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008 (in Russian)

13. Potapova D.A., Rendyuk T.D., Dul V.N., Chuprina E.V. Elemental composition of broccoli cabbage (*Brassica oleracea* L. Var. *Italica* Plenck) // Collection of scientific papers of the International scientific and Practical Conference "Biological features of medicinal and aromatic plants and their role in medicine", 2016. pp. 404–406. (in Russian)
14. *Soils of the state farm "Zheleznodorozhny" of Novosibirsk region and recommendations for their use.* Novosibirsk, ZAPSIBGIPROZEM, 1982, 54 p. (in Russian)
15. *Practical course of agrochemistry.* Editor: V.G. Mineev. Moscow, Moscow State University Publishing House, 2001, 689 p. (in Russian)
16. Fotev Yu.V., Artemyeva A.M., Fateev D.A., Naumova N.B., Bugrovskaya G.A., Belousova V.P., Kukushkina T.A. Results of SSR analysis, properties of plant morphology and biochemical composition of Chinese broccoli – a new vegetable crop for Russia // *Vegetables of Russia*, 2018, No. 1(39), pp. 12–19. DOI: [10.18619/2072-9146-2018-1-12-19](https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-1-12-19) (in Russian)
17. Ali M., Abustan I. A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*. 2014. Vol. 4. pp. 1–9. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>
18. Arrouays D., McBratney A., Minasny B., Hempel J., Heuvelink G., MacMillan R., Hartemink A., Lagacherie P., McKenzie N. The Global Soil Map project specifications. In: Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., Richer de Forges A., McBratney A.B. (ed) *Global Soil Map: Basis of the Global Spatial Soil Information System – Proceedings of the 1st Global Soil Map Conference.* Orleans, France, CRC Press, 2014, pp. 9–12.
19. Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F., Konopka A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994. Vol. 58. pp. 1501–1511.
20. Chen S., Martin M.P., Saby N.P., Walter C., Angers D.A., Arrouays D. Fine resolution map of top-and subsoil carbon sequestration potential in France // *Sci Total Environ*, 2018, Vol. 630. pp. 389–400. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.02.209](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.209)
21. Gastal F., Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective // *J Exp Bot*, 2002, Vol. 53(370). pp. 789–799. DOI: [10.1093/jexbot/53.370.789](https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789)
22. Geng Y., Cao G., Wang L., Wang S. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution // *PLoS ONE*, 2019, Vol. 14(7). DOI: [10.1371/journal.pone.0219512](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219512)
23. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The Methods of Geomorphometry and Digital Soil Mapping for Assessing Spatial Variability in the Properties of Agrogray Soils on a Slope // *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50. pp. 20–29. DOI: [10.1134/S1064229317010082](https://doi.org/10.1134/S1064229317010082)
24. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indicative Capacity of NDVI in Predictive Mapping of the Properties of Plow Horizons of Soils on Slopes in the South of Western Siberia // *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, pp. 1332–1343. DOI: [10.1134/S1064229317110060](https://doi.org/10.1134/S1064229317110060)
25. Goovaerts P. *Geostatistics for natural resources evaluation.* Oxford University Press, New York, 1997.
26. Govers G., Merckx R., van Wesemael B., Van Oost K. Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. *SOIL*, 2017, Vol. 3. pp. 45–59. DOI: [10.5194/soil-3-45-2017](https://doi.org/10.5194/soil-3-45-2017)
27. Hengl T.A. *Practical guide to geostatistical mapping of environmental variables.* Ispra (Italy): EC JRC, 2007. 165 p.
28. Holm S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure // *Scandinavian Journal of Statistics*, 1979, Vol. 6., No. 2., pp. 65–70.
29. Isaaks E. H., Srivastava R.M. *Applied Geostatistics.* Oxford University Press, New York, 1989.
30. Kalra Y.P. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis.* CRC Press, Boston, 1998. 287 p.
31. Lal R., Hall G.F., Miller F.P. Soil degradation: I. Basic processes // *Land Degrad Dev*, 1989, Vol.1. pp. 51–69.
32. Oldeman L.R. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. ISRIC, Wageningen, 1988, No. 88/4,
33. Oliver M.A. *Geostatistical applications for precision agriculture.* Springer, London, 2010.
34. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B. Using deep learning for digital soil mapping. *SOIL*. 2019. Vol. 5. pp. 79–89. DOI: [10.5194/soil-5-79-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-79-2019)
35. Pannatier Y. *Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D.* New York: Springer-Verlag, 1996. 91 p.
36. Pimentel D. Soil erosion: A food and environmental threat // *Environ Dev Sustain*, 2006, Vol. 8. pp. 19–137. DOI: [10.1007/s10668-005-1262-8](https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8)
37. Razis A.F.A., Noor N.M. Cruciferous vegetables: Dietary phytochemicals for cancer prevention // *Asian Pac. J. Cancer Prev*. 2013. Vol. 14. pp. 1565–1570. DOI: [10.7314/apjcp.2013.14.3.1565](https://doi.org/10.7314/apjcp.2013.14.3.1565)
38. Singh J., Knapp H.V., Demissie M. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey Contract Report 2004–08, 2004. pp. 1–24. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/94220/ISWSCR2004-08.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
39. *Soil organic carbon mapping Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, Rome, 2018.
40. *Soil Sampling and Methods of Analysis* / Edited by M.R. Carter and E.G. Gregorich. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2008, 1224 p.

41. Suleymanov A., Abakumov E., Suleymanov R., Gabbasova I., Komissarov M. The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 2021, 10, 243. DOI: [10.3390/ijgi10040243](https://doi.org/10.3390/ijgi10040243)
42. Sumfleth K., Duttmann R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators // *Ecol Indic*, 2008, Vol. 8 (5). pp. 485–501. DOI: [10.1016/j.ecolind.2007.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.05.005)
43. Verhoeven D.T., Goldbohm R.A., van Poppel G., Verhagen H., van den Brandt P.A. Epidemiological studies on Brassica vegetables and cancer risk // *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev*, 1996, Vol. 5, pp. 733–748.

Received 24 September 2021

Accepted 02 December 2021

Published 12 December 2021

About the author:

Gopp Natalya Vladimirovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); gopp@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)