

Ирина Юрьевна Ботвич^{1✉}, Дмитрий Владимирович Емельянов²,
Анатолий Петрович Шевырногов³

¹Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

¹irina.pugacheva@mail.ru

²dima9526@gmail.com

³ap_42@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА ПОЛЯХ ОПХ «КУРАГИНСКОЕ» ФИЦ КНЦ СО РАН ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Цель исследования – разработка методов дифференцированного внесения удобрений на посевах зерновых культур по данным дистанционного зондирования. Задачи: разработать методы для дифференцированного внесения удобрений на посевах зерновых культур по данным дистанционного зондирования; провести построение и верификацию карт плодородия сельскохозяйственных угодий ОПХ «Курагинское»; выполнить построение карт-заданий для дифференцированного внесения азотных удобрений «по листу» и внутрипочвенно; провести дифференцированное внесение азотных удобрений «по листу» на сельскохозяйственных полях с помощью самоходного опрыскивателя «Туман-3». Проведена разработка, апробация и внедрение методов дифференцированного внесения удобрений на посевах зерновых культур в ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН. Разработанные авторские методы основываются на данных дистанционного зондирования. Для их реализации создано программное обеспечение, позволяющее в автоматическом режиме производить построение карт-заданий для дифференцированного внесения азотных удобрений «по листу» и внутрипочвенно на основе данных, полученных со спутников и беспилотных летательных аппаратов. Построены карты-задания для дифференцированного внесения удобрений на полях ОПХ «Курагинское» по спектральным данным высокого пространственного разрешения (по данным спутника Sentinel-2, беспилотных летательных аппаратов MicaSense RedEdge-MX). Проведена оценка внутрипольной вариабельности исследуемых сельскохозяйственных угодий. Разработан метод построения карт плодородия по данным дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения. Проведена верификация карты плодородия по данным агрохимического анализа почвенных проб. Показано наличие высокой корреляционной связи между данными почвенных показателей и значений уровня плодородия. Наибольшая степень связи – между значением величины уровня плодородия и содержанием нитратного азота (0,91). Коэффициент корреляции с содержанием гумуса также достаточно высокий и составляет 0,8.

Ключевые слова: точное земледелие, дифференцированное внесение удобрений, карты-задания для внесения удобрений, данные спутника, данные беспилотных летательных аппаратов

Для цитирования: Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П. Разработка и внедрение методов дифференцированного внесения удобрений на полях ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН по данным дистанционного зондирования // Вестник КрасГАУ. 2025. № 4. С. 55–64. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-4-55-64.

Irina Yurievna Botvich^{1✉}, Dmitry Vladimirovich Emelyanov², Anatoly Petrovich Shevyrnogov³

¹Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

¹irina.pugacheva@mail.ru

²dima9526@gmail.com

³ap_42@mail.ru

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF METHODS OF DIFFERENTIATED APPLICATION OF FERTILIZERS IN THE FIELDS OF THE EPF KURAGINSKOYE OF THE FEDERAL RESEARCH CENTER KSC SB RAS BASED ON REMOTE SENSING DATA

The objective of the study is to develop methods for differentiated application of fertilizers to grain crops based on remote sensing data. Objectives: to develop methods for differentiated application of fertilizers to grain crops based on remote sensing data; to construct and verify fertility maps of agricultural lands of the Kuraginskoye Experimental Farm; to construct task maps for differentiated application of nitrogen fertilizers "by leaf" and intrasoil; to carry out differentiated application of nitrogen fertilizers "by leaf" on agricultural fields using the Tuman-3 self-propelled sprayer. The development, testing and implementation of methods for differentiated application of fertilizers to grain crops in the Kuraginskoye Experimental Farm of the KSC SB RAS were carried out. The developed author's methods are based on remote sensing data. For their implementation, software was created that allows for automatic construction of task maps for differentiated application of nitrogen fertilizers "by leaf" and intrasoil based on data obtained from satellites and unmanned aerial vehicles. Task maps for differentiated application of fertilizers in the fields of the Kuraginskoye experimental farm were constructed based on high-resolution spectral data (according to the Sentinel-2 satellite and MicaSense RedEdge-MX unmanned aerial vehicles). Intra-field variability of the studied agricultural lands was assessed. A method for constructing fertility maps based on high-resolution remote sensing data was developed. The fertility map was verified based on agrochemical analysis of soil samples. A high correlation was shown between the data on soil indicators and the values of the fertility level. The highest degree of correlation is between the value of the fertility level and the content of nitrate nitrogen (0.91). The correlation coefficient with the humus content is also quite high and is 0.8.

Keywords: precision farming, differentiated fertilization, fertilizer application maps, satellite data, unmanned aerial vehicle data

For citation: Botvich IYu, Emelyanov DV, Shevyrnogov AP. Development and implementation of methods of differentiated application of fertilizers in the fields of the EPF Kuraginskoye of the FRC KSC SB RAS based on remote sensing data. *Bulletin of KSAU*. 2025;(4):55-64. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-4-55-64.

Введение. В последнее десятилетие уровень технологии сельскохозяйственного производства испытывает революционные технологические изменения. Это можно сравнить с аналогичными технологическими достижениями в изучении биосферы в целом. Одновременное стремительное развитие космонавтики и новых информационных технологий позволило совершенно по-новому подойти к изучению и пониманию биологических процессов на планете Земля.

В области развития сельскохозяйственных технологий также наблюдается внедрение оптических дистанционных технологий и появление новых принципов и алгоритмов обработки пространственных данных сельскохозяйственных территорий. Такие подходы, их применение и

доведение до практических решений сразу же приводят к быстрому экономическому эффекту.

В прошлом веке внедрение новых методов ведения сельского хозяйства, например, способствовало удовлетворению растущего спроса на продовольствие и другие аграрные продукты. Однако, с учетом прогнозируемого увеличения численности населения и роста доходов, ожидается дальнейшее возрастание нагрузки на природные ресурсы. В условиях усиливающегося осознания негативных экологических последствий сельскохозяйственной деятельности возникает необходимость в разработке новых методов и подходов, способных удовлетворить будущие потребности в продовольствии при минимизации воздействия на окружающую среду.

Использование современных технологий, включая геоинформационные системы, технологии big data и искусственный интеллект, дает возможность разрабатывать инструменты для принятия наиболее эффективных управленческих решений, позволяющих повышать продуктивность сельскохозяйственного производства. Развитие и внедрение методов точного земледелия на предприятиях АПК позволяет оптимизировать имеющиеся сельскохозяйственные ресурсы и повысить урожайность сельскохозяйственных культур. За последние десятилетия значительное развитие получили методы точного земледелия, основанные на использовании данных дистанционного зондирования. Использование этих данных позволяет наиболее эффективно и в полном объеме проводить мониторинг состояния посевов, вносить удобрения и пестициды, производить прогноз урожайности сельскохозяйственных культур.

Данные беспилотных и спутниковых съемок позволяют получать актуальную информацию о состоянии исследуемых объектов в кратчайшие сроки. Значительный рост производства и использования беспилотных летательных аппаратов позволяет получать данные высокого разрешения в сантиметровом масштабе. Одновременно с этим происходит непрерывный рост объема доступных спутниковых данных, что способствует разработке передовых методов их хранения и обработки, таких как облачные вычисления и машинное обучение. Перед исследователем стоит задача объединения большого количества данных, имеющих разные источники и смысловую нагрузку. Реализация и внедрение задач точного земледелия требуют использования специализированных алгоритмов и программных средств. При этом разработчики должны обладать не только техническими знаниями, но и иметь опыт и знания особенностей роста и развития сельскохозяйственных культур, внесения удобрений, пестицидов и т. д. Важным является разработка простого, но надежного рабочего процесса. Это позволит ускорить практическое внедрение разработанных методов и средств и получить требуемый экономический и экологический эффект.

Ключевой особенностью точного земледелия является учет внутривидовой вариативности почвенного плодородия. В традиционных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур удобрения вносятся на основе усред-

ненных данных агрохимического обследования [1–5]. В точном земледелии выбор агроприемов для производства растениеводческой продукции и управления нормированным внесением ресурсов зависит от уровня внутривидовой неоднородности. Важно отметить, что в рамках данного подхода особое внимание следует уделить более глубокому изучению пространственной неоднородности сельскохозяйственных угодий, а также разработке методов для ее выявления, количественного анализа и определения границ изменчивости на конкретном поле [1, 6].

Цель исследования – разработка методов дифференцированного внесения удобрений на посевах зерновых культур по данным дистанционного зондирования.

Задачи: разработать методы для дифференцированного внесения удобрений на посевах зерновых культур по данным дистанционного зондирования; провести построение и верификацию карт плодородия сельскохозяйственных угодий ОПХ «Курагинское»; выполнить построение карт-заданий для дифференцированного внесения азотных удобрений «по листу» и внутривидовому; провести дифференцированное внесение азотных удобрений «по листу» на сельскохозяйственных полях с помощью самоходного опрыскивателя «Туман-3».

Объекты и методы. Исследования выполнены на сельскохозяйственных угодьях опытно-производственного хозяйства (ОПХ) «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН. ОПХ «Курагинское» расположено в Курагинском районе Красноярского края [7]. Площадь исследуемых угодий, засеянных зерновыми культурами, составила 3128 га. Почвенный покров представлен серыми лесными почвами, черноземами, лугово-черноземными, луговыми и болотными почвами. В структуре почвенного покрова черноземами занято 47,2 % почв, темно-серыми лесными – 14,2, лугово-черноземными почвами – 9,4 и луговыми почвами – 2,3 % [8]. Средневзвешенное содержание гумуса в 0–20 см слое пахотных почв Курагинского района – 7,1 %, pH_{KCl} – 6,0, подвижный фосфор – 160 мг/кг, обменный калий – 94 мг/кг [9].

Оценка состояния растительности выполнена по спутниковым и беспилотным данным. Для верификации полученных результатов использовались наземные данные об урожайности исследуемых полей, данные агрохимического анализа почв. Беспилотный мониторинг полей проводил-

ся с помощью «Геоскан-201 Агро» с полезной нагрузкой в виде камер: RGB-камеры (Sony RX11RII) и мультиспектральной камеры (MicaSense RedEdge-MX) (<https://geoscan.aero/ru>). Мультиспектральная съемка MicaSense RedEdge-MX проводилась в пяти каналах: синем (475 нм); зеленым (560 нм); красном (668 нм); красный край (Red Edge) (717 нм); ближнем – ИК (840 нм) [7, 10]. Съемка аппаратурой «Геоскан-201» выполнялась на высоте 550 метров, пространственное разрешение мультиспектральных данных 44 см. Измерения проводились в течение периодов вегетации 2022 и 2023 гг. в основные фазы вегетации – посев, всходы, кущение, выход в трубку, колошение, созревание. Спутниковый мониторинг выполнен по данным спутников Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров (https://esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2).

Оценка состояния растительности выполнена по величине вегетационных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [7, 10, 11] и TIN (Time Integrated NDVI). TIN (Time Integrated NDVI) – интегральная величина вегетационного индекса NDVI, характеризующая фотосинтетическую активность растительного покрова в течение периода вегетации.

Контрольные испытания эффективности дифференцированного внесения удобрений произведены на участках № 13_47 и № 13_119, засеянных пшеницей. До середины июля азотные удобрения «по листу» на всех участках вносили 2 раза сплошным методом (в одинаковой дозе по всем участкам). При третьем внесении удобрений на поле № 13_47 удобрение вносили классическим методом – в одной дозе по всему полю, № 13_119 – дифференцированное внесение удобрений.

Результаты и их обсуждение. Анализ полученных многолетних данных показал наличие внутривольной неоднородности сельскохозяйственных угодий. Установлено, что коэффициент вариации NDVI на отдельных полях в фазу кущения может варьировать до 34 %. Одним из ключевых преимуществ применения карт внутривольной неоднородности является способность идентифицировать зоны с различной степенью плодородия. В условиях применения традиционных агротехнологий не осуществляется учет неоднородности поля. Внесение минеральных удобрений производится в равной дозе на всей площади поля, что может приво-

дить к их избыточному или недостаточному количеству. Избыточное внесение минеральных удобрений оказывает негативное воздействие на окружающую среду и фитотоксический эффект на сельскохозяйственные культуры [10].

В 2022 г. в ОПХ «Курагинское» в результате совместной работы сотрудников ИБФ СО РАН и ОПХ «Курагинское» впервые проведено дифференцированное внесение азотных удобрений «по листу» на посевах зерновых культур по данным беспилотной съемки [7, 10]. Карты-задания для дифференцированного внесения азотных удобрений на посевах зерновых культур (рис. 1, а) построены по авторской методике с использованием специализированного программного средства, разработанного авторами данной работы [12]. Расчет производился по данным значений NDVI в фазу кущения (рис. 1, б).

В качестве азотного удобрения использовали карбамид. Состав подкормки включал карбамид – 6 кг/га + сульфат магния – 2 кг/га + вода – 100 л/га. Выбор применения карбамида обусловлен тем, что он имеет максимальную величину действующего вещества из всех имеющихся (46,2 %). Амидная форма азота обеспечивает пролонгированное питание растений и хорошо усваивается через устьица листовых аппаратов. Сульфат магния блокирует биурет, содержащийся в карбамиде, который может вызывать ожоги растений. Сера, входящая в сульфат магния, позволяет растениям более полно использовать азот от удобрений и повышает качество клейковины. Внесение удобрений выполнено в автоматическом режиме с помощью самоходного опрыскивателя «Туман-3».

В качестве индикатора состояния растительности использовали индекс NDVI, по его величине производилось разделение на классы. Представленные карты-задания включали три класса с разной нормой внесения удобрений. 1-й класс (наиболее высокие значения NDVI) – 35 л/га (синий цвет); 2-й класс (средние значения NDVI) – 42 л/га (желтый цвет); 3-й класс (наименьшие значения NDVI) – 50 л/га (красный цвет). Высокие значения NDVI указывают на высокий объем наземной фитомассы растительности. Низкие значения NDVI – на низкий объем фитомассы. Растения лесостепной зоны Красноярского края очень отзывчивы на внесение азотных удобрений. Причиной этого является то, что в почвах края в минимуме находится именно азот. Разделение сельскохозяйственного поля на участки с

разным состоянием растений позволяет дозированно вносить удобрение там, где оно необходимо и в требуемой норме.

В ходе проведенных исследований установлено, что для дифференцированного внесения азотных удобрений «по листу» необходимо использовать данные беспилотных или спутниковых съемок, наиболее приближенные к дате внесения удобрений. Поскольку именно они отражают текущее состояние растительности.

Многолетний опыт анализа состояния растительности посевов сельскохозяйственных культур по спутниковым и беспилотным данным позволил авторам разработать метод построения карт-заданий для дифференцированного внутрипочвенного внесения удобрений. Внутрипочвенное внесение удобрений является определяющим в качестве растениеводческой продукции, так как минеральные удобрения оказывают существенное влияние на агрохимические свой-

ства почвы. В качестве комплексного серосодержащего, азотно-фосфорного удобрения предполагается внесение сульфоаммофоса или его аналогов. Для дифференцированного внутрипочвенного внесения удобрений разработан метод, основанный на использовании многолетних данных дистанционного зондирования.

На рисунке 2 представлены карты пространственного распределения значений индекса TIN поля № 9, полученные по спутниковым данным Sentinel-2 за период 2019–2023 гг. Установлено, что 20,32 % от всей площади поля это устойчивые зоны с повышенным и пониженным уровнем плодородия. Построение карт плодородия произведено на основании многолетнего анализа значений индекса TIN. На рисунке 3 представлена карта пространственного распределения значений индекса плодородия на полях № 8–10, полученная по спутниковым данным Sentinel-2.

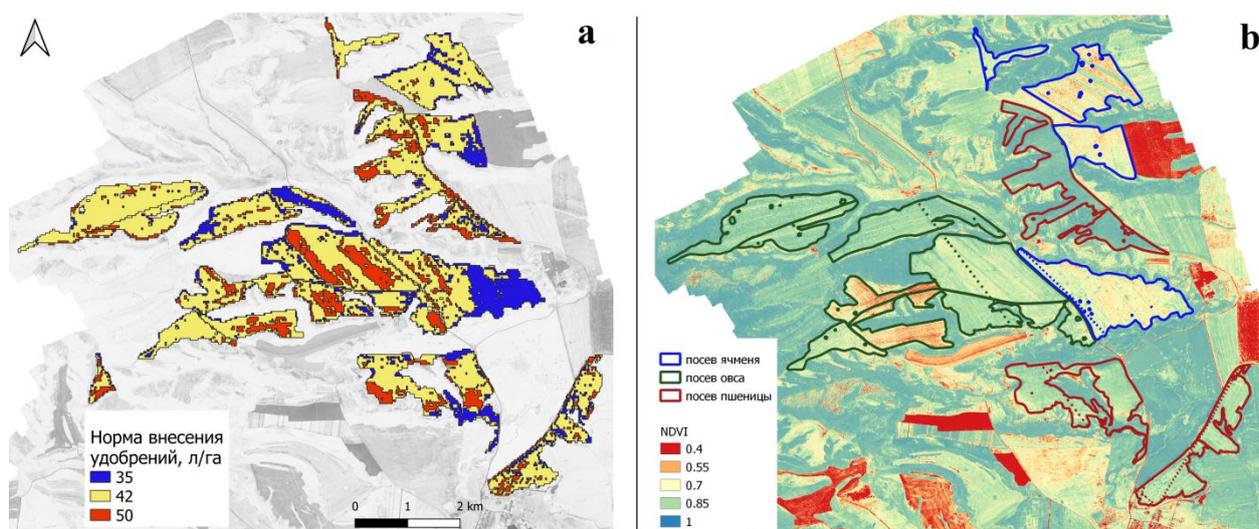


Рис. 1. Карты-задания для дифференцированного внесения азотных удобрений (а).
Пространственное распределение значений NDVI, построенное по данным беспилотной съемки (b) (22–23 июня 2022 г.)

*Task maps for differentiated nitrogen fertilizer application (a).
Spatial distribution of NDVI values based on drone survey data (b) (June 22-23, 2022)*

Для верификации полученной карты плодородия произведен отбор почвенных проб на 14 тестовых участках. Отбор произведен 9 октября 2023 г. на полях № 9 и 10. Почвенные образцы отобраны на глубине 0–20 см. Проведен агрохимический анализ почвенных проб в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Красноярский». Исследуемые показатели: орга-

нического вещества (гумуса), подвижного фосфора (P_2O_5), подвижного калия (K_2O), нитратного азота ($N-NO_3$), рН солевой вытяжки.

Согласно построенным по беспилотным и спутниковым данным картам плодородия, участки № 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 расположены в зонах высокого плодородия, участки № 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 – в зонах низкого плодородия.

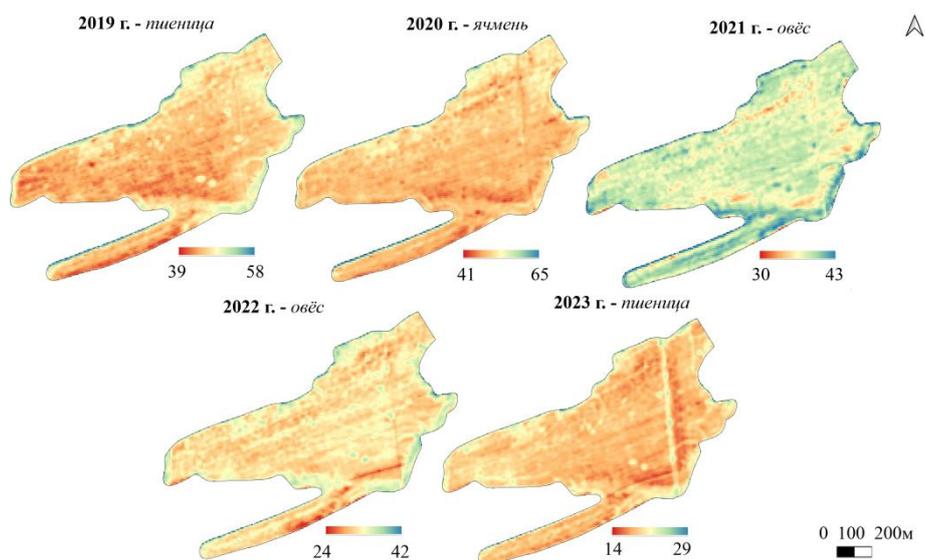


Рис. 2. Пространственное распределение значений индекса TIN поля № 9 с 2019 по 2023 г. (по данным Sentinel-2)

Spatial distribution of the TIN index values of field No. 9 from 2019 to 2023 (according to Sentinel-2)

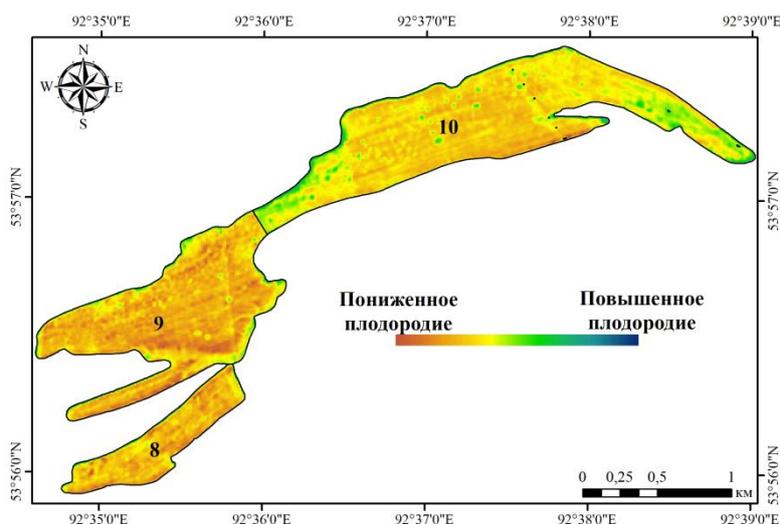


Рис. 3. Карта пространственного распределения значений индекса плодородия полей № 8–10 по спутниковым данным Sentinel-2

Map of the spatial distribution of field fertility index values № 8–10 according to Sentinel-2 satellite data

В таблице представлены основные статистические величины (mean – среднее и stdev – стандартное отклонение) показателей гумуса, P₂O₅, K₂O, N-NO₃ и pH в зонах с высоким и низким уровнем плодородия. Установлено, что наибольшие различия получены в показателях для исследуемых зон по содержанию нитратного азота (61,4 %) и подвижного калия (48,7 %). Количество гумуса в зонах высокого плодородия также превышает его количество в зонах низкого плодородия на 26,5 %. Разница в со-

держании подвижного фосфора и pH солевой вытяжки в зонах не превышает 4 %.

В результате корреляционного анализа данных почвенных показателей и значений уровня плодородия установлено, что наибольшая степень связи между значением величины уровня плодородия и содержанием нитратного азота – 0,91. Коэффициент корреляции с содержанием гумуса также достаточно высокий и составляет 0,8. Коэффициент корреляции с содержанием подвижного калия также достаточно высокий и

составляет 0,7. Таким образом, проведенные наземные исследования позволили верифицировать полученные карты плодородия, пос-

троенные по беспилотным и спутниковым данным, согласно предложенному методу.

Статистические характеристики почвенных показателей зон с высоким и низким уровнем плодородия
Statistical characteristics of soil indicators of zones with high and low fertility

Показатель	Массовая доля		Разница, %
	Зона плодородия		
	Высокая (mean/stdev)	Низкая (mean/stdev)	
Органическое вещество (гумуса), %	10,93/1,19	8,03/1,58	26,5
Подвижный фосфор (P ₂ O ₅), млн ⁻¹	302,29/29,66	313,29/38,76	3,5
Подвижный калий (K ₂ O), млн ⁻¹	133/37,47	68,29/7,7	48,7
Нитратный азот (N-NO ₃), млн ⁻¹	14,41/3,05	5,56/2,11	61,4
pH солевой вытяжки, pH	5,20/0,17	5,41/0,09	4

На рисунке 4 представлены карты-задания для дифференцированного внесения основных удобрений для полей № 8–10 ОПХ «Курагинское», построенные по полученным картам плодородия полей. В результате проведенной работы выделено три класса в зависимости от состояния растительного покрова. 1-й класс имеет наиболее высокую степень плодородия, 3-й класс – наименьшую и 2-й класс является

промежуточным. В соответствии с полученными картами плодородия, рекомендациями агронома и на основе проведенного агрохимического анализа почв были установлены нормы внесения удобрений: 1 класс (синий цвет) – имеет норму внесения удобрений 40 кг/га, 2-й класс (желтый) – 70 кг/га, 3-й класс (красный) – 100 кг/га.

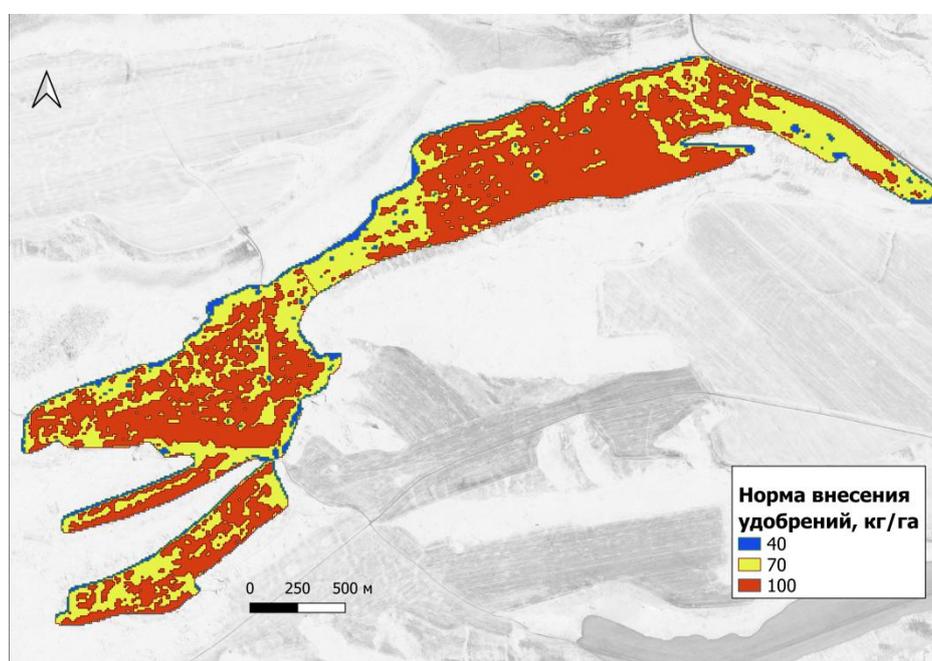


Рис. 4. Карты-задания для дифференцированного внутрпочвенного внесения (внутрпочвенных) удобрений на полях № 8–10

Task maps for differentiated intra-soil application of (intra-soil) fertilizers in fields № 8–10

Проведенные расчеты и данные литературных источников показали, что экономическая эффективность использования дифференцированного внесения удобрений может достигать до 30 % для отдельных полей. Важнейшими преимуществами дифференцированного внесения минеральных удобрений является высокая экономическая эффективность их использования, а также снижение риска загрязнения окружающей среды избыточным количеством минеральных удобрений [7, 10].

Заключение. В ходе проведенных исследований были получены важные результаты и сделаны следующие выводы.

Использование беспилотных («Геоскан-201») и спутниковых (Sentinel-2) данных с высоким временным и пространственным разрешением позволило детально изучить состояние сельскохозяйственных угодий на территории ОПХ «Курагинское».

На основе данных дистанционного зондирования был создан новый метод построения карт плодородия, что значительно улучшило точность агрономических решений.

В ОПХ «Курагинское» была успешно внедрена технология дифференцированного внесения удобрений. Показана ее высокая результативность и экономическая эффективность.

Создано специализированное программное обеспечение для построения карт-заданий для

дифференцированного внесения азотных удобрений «по листу» и для внутрпочвенного применения. Это позволило оптимизировать процесс внесения удобрений и минимизировать почвенную неоднородность.

Проведены контрольные испытания эффективности дифференцированного внесения удобрений на тестовых участках № 13_47 и 13_119. Установлено, что с начала июля и до 31 августа разница значений коэффициентов вариаций NDVI полей № 13_47 и 13_119 изменилась с 0,8 до 7,3 %. Расчет коэффициентов вариации NDVI на тестовых участках посевов пшеницы показал, что в результате дифференцированного внесения удобрений поле № 13_119 стало более однородным, чем поле № 13_47, где удобрения были внесены сплошным методом. Однородное созревание посева является крайне важным. Оно позволяет проводить уборку в более оптимальные сроки, тем самым снижается риск потери урожая из-за дождя или других неблагоприятных условий. Зерно убирается в одинаковой степени зрелости, что влияет на его качество и важно при дальнейшей его переработке.

Проведенные расчеты показали, что экономическая эффективность использования дифференцированного внесения удобрений может достигать до 30 % для отдельных полей.

Список источников

1. Афанасьев Р.А. Агрохимические аспекты точного земледелия // Проблемы агрохимии и экологии. 2010. № 2. С. 38–43. EDN: NBHBRZ.
2. Якушев В.П. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета «умное сельское хозяйство» России // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 2. С. 11–15. DOI: 10.30850/vrsn/2019/2/11-15. EDN: ZBFLJJ.
3. Костычев П.А. Почвы черноземной области России, их происхождение, состав и свойства. М.: Сельхозгиз, 1949. 151 с.
4. Стебут И.А. Избранные сочинения: монография в 2 т. Т. 2. М.: Сельхозгиз, 1957. 791 с.
5. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения. Т. 1. М.: Колос, 1965. 721 с.
6. Астахов В.С., Иванчиков Г.О. Проблемы применения систем точного земледелия при дифференцированном внесении твердых минеральных удобрений и пути их решения // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1. С. 133–136. EDN: ADPSFW.
7. Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырнов А.П. Дифференцированное внесение удобрений на полях ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН. В сб.: Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023)». Новосибирск, 2023. С. 221–225. DOI: 10.25743/sdm.2023.39.68.037. EDN: AYONAV.
8. Ерунова М.Г., Симакина А.С., Шпедт А.А., и др. Цифровая почвенная карта опытно-производственного хозяйства «Курагинское» Красноярского края // Региональные системы

- комплексного дистанционного зондирования агроландшафтов. В сб.: III Всероссийский научно-практический семинар, Красноярск, 25 февраля 2021 года. Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН. 2021. С. 114–120. DOI: 10.52686/9785604524923_114. EDN: IQIHJ.
9. Волошин Е.И., Сергеев А.П., Юферова Е.В. Мониторинг содержания фтора в почвах Минусинской лесостепи Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2021. № 6 (171). С. 71–78. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-6-71-78. EDN: NHGAPO.
 10. Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., и др. Развитие методов дифференцированного внесения удобрений по данным высокого пространственного разрешения (PlanetScope, DJI Phantom 4 Multispectral, Micasense Rededge-MX). В сб.: Международная научно-производственная конференция с международным участием «Современные проблемы и перспективы развития агрохимии, земледелия и смежных наук о плодородии почв и продуктивности полевых культур в Сибири». Красноярск, 2023. С. 254–259. DOI: 10.52686/9785604525050_398. EDN: ZGKILK.
 11. Deering D.W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors // Ph. D. Dissertation. Texas A & M University. College Station. 1978. TX. 338 p.
 12. Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В. Построение карт-заданий для дифференцированного внесения азотных удобрений по беспилотным и спутниковым данным // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023688068, 20.12.2023. Заявка от 30.11.2023.

References

1. Afanas'ev RA. Agrochemical aspects of precision agriculture. *Agrochemistry and ecology problems*. 2010;2:38-43. (In Rus.). EDN: NBHBRZ.
2. Jakushev VP. Digital technologies of precision farming in the implementation of the priority "smart agriculture" in Russia. *Vestnik Rossijskoj sel'skhozjajstvennoj nauki*. 2019;2:11-15. (In Rus.). DOI: 10.30850/vrsn/2019/2/11-15. EDN: ZBFLJJ.
3. Kostychev PA. *Pochvy chernozemnoj oblasti Rossii, ih proishozhdenie, sostav i svojstva*. M.: Sel'hozgiz, 1949. (In Rus.).
4. Stebut IA. *Izbrannye sochinenija*. Vol. 2, V. 1. Moscow: Sel'hozgiz. 1957. (In Rus.).
5. Prjanishnikov DN. *Izbrannye sochinenija*. Vols. 2, V. 1. Moscow: Kolos. 1956. (In Rus.).
6. Astahov VS, Ivanchikov GO. Problems of using precision farming systems with differentiated application of solid mineral fertilizers and ways to solve them. *Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skhozjajstvennoj akademii*. 2022;1:133-136. (In Rus.). EDN: ADPSFW.
7. Botvich IYu, Emelyanov DV, Shevyrnogov AP. Differentiated application of fertilizers on the fields of the Kuraginskoe agricultural holding, FRC KSC SB RAS. In: *Vserossijskaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem "Obrabotka prostranstvennyh dannyh v zadachah monitoringa prirodnyh i antropogennyh processov (SDM-2023)"*. Novosibirsk, 2023. P. 221–225. (In Rus.). DOI: 10.25743/sdm.2023.39.68.037. EDN: AYONAV.
8. Erunova MG, Simakina AS, Shpedt AA, et al. Cifrovaya pochvennaya karta opytно proizvodstvennogo hozyajstva «Kuraginskoe» Krasnoyarskogo kraja. In: *III Vserossijskiy nauchno-prakticheskiy seminar "Regional'nye sistemy kompleksnogo distancionnogo zondirovaniya agrolandshaftov"*. Krasnoyarsk, 25 Feb 2021. Krasnoyarsk: FIC KSC SB RAS, 2021. P. 114–120. (In Rus.). DOI: 10.52686/9785604524923_114. EDN: IQIHJ.
9. Voloshin EI, Sergeev AP, Yuferova EV. Monitoring sodержaniya ftora v pochvah Minusinskoj lesostepi Krasnoyarskogo kraja. *Bulletin KSAU*. 2021;6:71-78. (In Rus.). DOI: 10.36718/1819-4036-2021-6-71-78. EDN: NHGAPO.
10. Botvich IYu, Emelyanov DV, Shevyrnogov AP, et al. Evelopment of variable rate technology based on high spatial resolution data (Planetscope, DJI Phantom 4 Multispectral, Micasense Rededge-MX). In: *Mezhdunarodnaya nauchno-proizvodstvennaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya agrohimii, zemledeliya i smezhnyh nauk o plodorodii pochv i produktivnosti polevyh kul'tur v Sibiri"*. Krasnoyarsk, 2023. P. 254–259. (In Rus.). DOI: 10.52686/9785604525050_398. EDN: ZGKILK.

11. Deering DW. *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*. Ph. D. thesis. Texas. 1978
12. Botvich IYu, Emelyanov DV. Patent RF № 2023688068. Krasnoyarsk: IP Russian Federation. (In Rus.).

Статья принята к публикации 11.03.2025 / The article accepted for publication 11.03.2025.

Информация об авторах:

Ирина Юрьевна Ботвич¹, младший научный сотрудник лаборатории экологической информатики
Дмитрий Владимирович Емельянов², ведущий инженер лаборатории экологической информатики
Анатолий Петрович Шевырногов³, главный научный сотрудник лаборатории экологической информатики, доктор технических наук

Information about the authors:

Irina Yurievna Botvich¹, Junior Researcher, Laboratory of Environmental Informatics
Dmitry Vladimirovich Emelyanov², Leading Engineer at the Laboratory of Environmental Informatics
Anatoly Petrovich Shevyrnogov³, Chief Researcher at the Laboratory of Environmental Informatics, Doctor of Technical Sciences

