

УДК 528.8:631.46

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-80-91

## Применение методов комплексной обработки данных дистанционного зондирования Земли для изучения процессов окарбоначивания почв с искусственным орошением

Д. В. Филиппов<sup>1</sup>, И. Н. Чурсин<sup>1\*</sup>, Д. Д. Рулёв<sup>1</sup>, А. Д. Бояренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), г. Москва, Российская Федерация  
\* e-mail: gislab@ngic.ru

**Аннотация.** В статье представлены методические исследования процессов окарбоначивания почв сельскохозяйственного назначения по данным дистанционного зондирования Земли. Исследования проведены на территории Светлоярской оросительной системы, расположенной в Волгоградской области. Рассмотрена совокупность методических подходов по комплексной цифровой обработке данных мультиспектральной космической съемки и результатов полевых исследований. Обобщен материал о дешифровочных признаках окарбоначенных земель и установлена взаимосвязь между спектральными яркостями пикселей и уровнем окарбоначивания на полях по диаграммам рассеяния, определены методы сбора полевых данных для комплексной обработки совместно со спутниковыми изображениями высокого разрешения. Выделены тестовые участки почв по уровню окарбоначивания с их графическим отображением на картографических схемах. Определена достоверность выявления зон пиксельного отображения окарбоначенных сельскохозяйственных земель на уровне 75 %.

**Ключевые слова:** мультиспектральная космическая съемка, окарбоначенные почвы, оросительная система, космические снимки

### Введение

В Российской Федерации решением задачи по разработке эффективных методов исследования больших площадей аридных территорий с применением данных дистанционного зондирования и картографических материалов занимаются с первой половины двадцатого века. Идеи применения аэрометодов для решения этой задачи были изложены еще в 1930–40-х гг. в трудах А. И. Левенгаупта, Л. Я. Селякова, И. С. Сметанина [1–3]. Одним из основоположников дистанционного изучения растительного покрова и почв был Е. Л. Кринов, который в своих исследованиях обобщил спектрально-отражательные способности природных ландшафтов [4]. Начиная с 60-гг. начала внедряться многозональная съемка, что расширило объем новых дешифровочных признаков ландшафтов для крупно- и среднемасштабного картографирования [5–9]. В 70-е и 80-е гг. производились исследования в разных районах черноземной зоны и на засоленных почвах аридных территорий [10, 11] с использованием черно-белых аэрофотоснимков масштабов 1 : 10 000, 1 : 17 000 и 1 : 25 000,

а также инфракрасных, цветных и цветных спектральных снимков масштаба 1 : 10 000. В 90-е гг. на основе применения геоинформационных технологий в процессах обработки изображений стали использоваться различные линейные комбинации каналов съемки, что позволило получать ориентированные в пространстве индексные изображения ландшафтов [12]. В настоящее время для мониторинга сельскохозяйственных земель широко используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), получаемые с оптических космических систем Pleiades, QuickBird, Landsat, ASTER, Ikonos и др. [13–23]. Проблемами информационного обеспечения материалами ДЗЗ и методами их обработки при изучении почв активно занимаются в Индии, США, Австралии, КНР и многих других странах мира.

Целью исследования является апробация методов комплексного пространственного мультиспектрального анализа космических изображений, получаемых с малых космических аппаратов, для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. Объектом для проведения исследований являлась терри-

тория Светлоярского орошаемого участка Светлоярской оросительной системы (ОС) в Волгоградской области. Выбор определялся тем, что Светлоярская ОС состоит из ряда орошаемых массивов, которые расположены в разных природных районах, а выбранный участок является наиболее изученным в полевых условиях. В дальнейшем есть перспектива использования полученных результатов при изучении орошаемых массивов, расположенных в других природных районах. В ходе выполнения работы апробированы современные методы обработки материалов ДЗЗ для мониторинга окарбонированных сельскохозяйственных земель по спутниковым данным с использованием современных инструментов анализа и прогноза. В результате выполнения исследований обобщен материал о дешифровочных признаках окарбонированных земель, а также установлена качественная взаимосвязь между спектральными яркостями пикселей мультиспектрального космического изображения и уровнем окарбонирования на полях с озимыми культурами по диаграммам рассеяния. На основе проведенного регрессионного анализа полевых данных и яркостей пикселей спутниковых изображений определены оптимальные признаки для дешифрирования орошаемых земель. С использованием классификаторов, обученных на отобранных признаках, выполнено картографирование тестовых участков по уровню засоления.

Задача выявления окарбонирования почв является одной из важнейших при почвенно-мелиоративных исследованиях [24, 25]. Разделение почв по степени окарбонирования возможно по спектральным характеристикам. Для почв, покрытых растительностью, наибольшую точность дают синтезированные изображения с инфракрасным каналом [26, 27]. Съемка в инфракрасной зоне спектра позволяет на ранних стадиях определить степень угнетения растений при отсутствии видимых признаков окарбонирования. Синтез каналов 4-2-1 (NIR: 760–900 nm, green: 520–600 nm, blue: 450–520 nm) дает хорошие результаты при визуальном разделении почв по степени окарбонирования. В ходе исследования было установлено, что пятнистость, выделяемая на космических изображениях, может сопровождаться заметным снижением урожайности или выпадом сельскохозяйственной культуры как от вторич-

ного засоления и солонцеватости, так и от окарбонирования почв с поверхности из-за плотной корки, образующейся на поле после дождей и поливов [28, 29]. В результате исследований сотрудниками Почвенного института им. В. В. Докучаева на Дубоовражном орошаемом массиве установлено, что пятнистость полей вызвана процессами окарбонирования почвы в пахотном горизонте.

### *Методы и материалы*

С участием сотрудников Почвенного института им. В. В. Докучаева проведены полевые исследовательские работы по оценке уровня окарбонирования почв на территории Дубоовражного орошаемого участка Светлоярской ОС с отбором почвенных проб. Результаты анализов почвенных проб, содержащие информацию о содержании карбонатов, сопоставлялись с отражательной способностью поверхности почвы в каналах RGB и NIR, на которой были собраны пробы [30–32].

По результатам полевых исследований и анализов почвенных образцов было установлено, что почвы, представленные на космических снимках более темными участками поля, характеризовались содержанием  $\text{CaCO}_3$  в пределах от 0 до 3–4 %. На почвах, представленных на космических снимках светлыми участками, количество составляло 4 % и более.

Первоначально для исследования возможностей распознавания по спутниковым изображениям почв с разным количеством карбонатов, а также для подбора оптимального алгоритма классификации космического снимка, рассматривалась информативность спектральных каналов мультиспектрального изображения. Информативностью канала в данном случае является степень влияния значений пикселей в канале на разделимость классов. Были составлены диаграммы рассеяния яркости пикселей (0–255) поверхности почв в четырех каналах: Blue (B1), Green (B2), Red (B3), NIR (B4). На рис. 1 представлена диаграмма рассеяния каналов (B1) и (B2), по которой видно, как распределились точки почв с разным количеством карбонатов по значениям яркости пикселей и относительно друг друга. По диаграмме можно определить следующее: с увеличением яркости отмечается увеличение содержания карбонатов в почвах; почвы с одина-

ковым количеством карбонатов группируются и имеют свои диапазоны яркостей. Таким образом, выделены две группы почв по содержанию карбонатов: 0–4 % и >4 %.

В работе проведен регрессивный анализ зависимости значения спектральных индексов от уровня засоления. Для выявления процессов окарбоначивания предложен метод автоматизированного дешифрирования по разновременным снимкам, состоящий из двух масштабных уровней. На первом масштабном уровне выполняется классификация космиче-

ских изображений с выделением сельскохозяйственных полей. Алгоритм из общей выборки создает наборы по общей декаде и месяцу. Под декадой понимается период времени длительностью в 10 дней, третья часть месяца. Для каждого набора строится обучающая модель на основе классификатора Random Forest (случайный лес) на языке программирования Python. Построенные модели проверяются с использованием кросс-валидации, а затем сохраняются в файл формата \*.joblib (рис. 2).

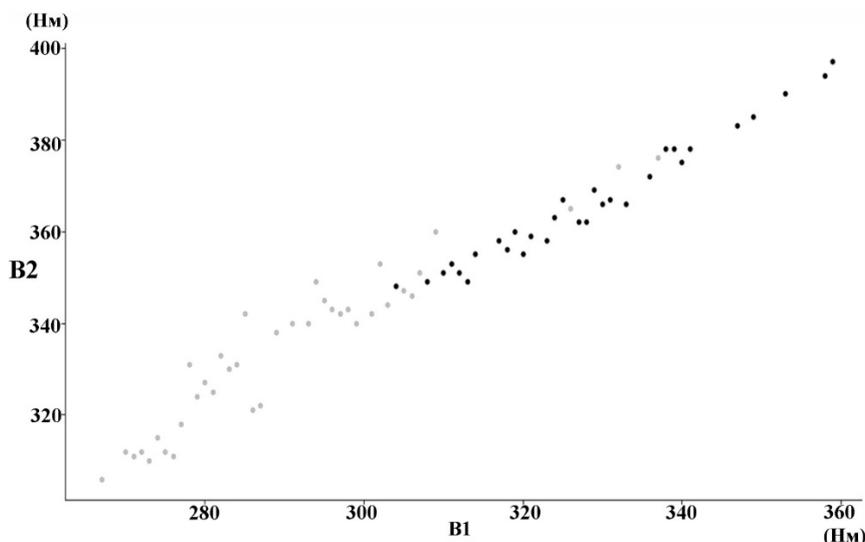


Рис. 1. Корреляция значений яркости пикселей в каналах Blue (B1) и Green (B2) спутникового изображения. Черным цветом показаны образцы сильноокарбонатенных почв, серым – слабоокарбонатенных

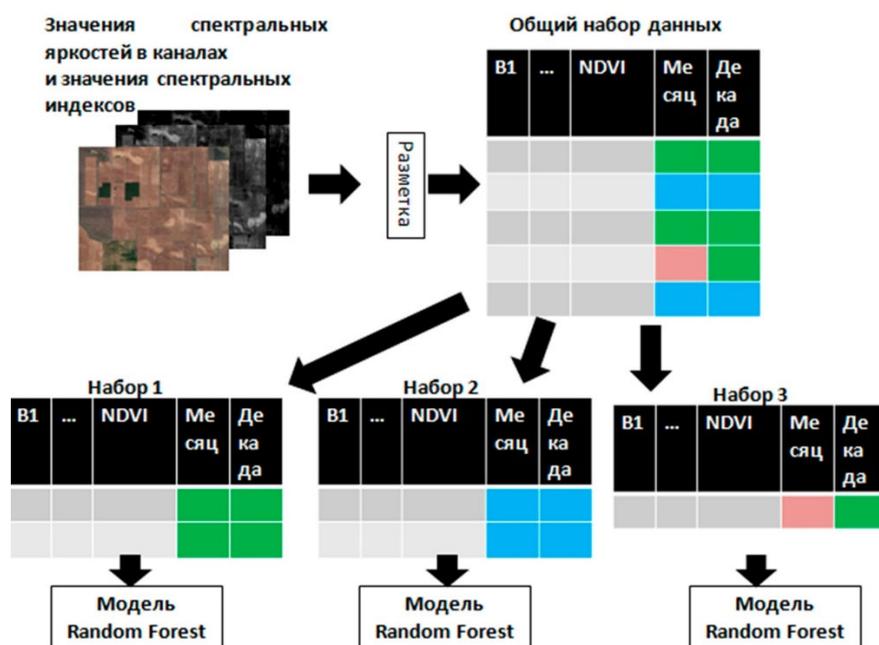


Рис. 2. Алгоритм классификации космических изображений

Первый масштабный уровень обработки – классификация космических изображений [33–35]. По результатам визуального дешифрирования сельскохозяйственных культур созданы обучающие выборки для алгоритма последовательного автоматизированного дешифрирования разновременных снимков. В алгоритме использовались следующие признаки: спектральная яркость в четырех каналах спутника Sentinel-2 и значения вегетационного нормализованного индекса NDVI. Предварительно по результатам дешифрирования создан векторный слой с границами полей. Обучающие выборки размечались на снимках за следующие даты: 27.02.2020, 28.06.2020. Далее создавалась отдельная выборка для каждого месяца и строилась обучающая модель на основе классификатора Random Forest (случайный лес) на языке программирования Python. Схема алгоритма классификации приведена на рис. 2.

Второй масштабный уровень обработки космических изображений – выявление окорбоначенных почв. В основу метода поиска окорбоначенных почв положен опыт сотрудников института им. В. В. Докучаева по оценке площадей, состояния орошаемых почв на основе спутниковой информации и полевых исследований, проведенных в Волгоградской области

в разных природных районах (Сарпинская низменность, возвышенность Ергени). В качестве основного источника информации могут использоваться космические снимки высокого разрешения. К ним относятся Landsat 8, Landsat 9, Sentinel 2, Канопус В, Ресурс-П. В данном исследовании были использованы космические снимки с разрешением 3 м в четырех спектральных каналах: синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный, полученные с российского космического аппарата Ресурс-П. В качестве полевых данных использовались результаты анализов полевых образцов почв, представленные Почвенным институтом им. В. В. Докучаева. По мнению специалистов института им. В. В. Докучаева [25], существует связь между проявлением пятнистости изображения космического снимка и уровнем окорбоначивания почв. Для удобства работы снимки были кадрированы по участкам работ. Далее проведен расчет индексных изображений по снимкам и создана обучающая выборка по полученным изображениям с помощью библиотек Python gdal, ogr, pandas. Затем выполнено создание классификационной модели и дальнейшая классификация с помощью алгоритма «Ансамбли деревьев». Схема второго масштабного уровня приведена на рис. 3.

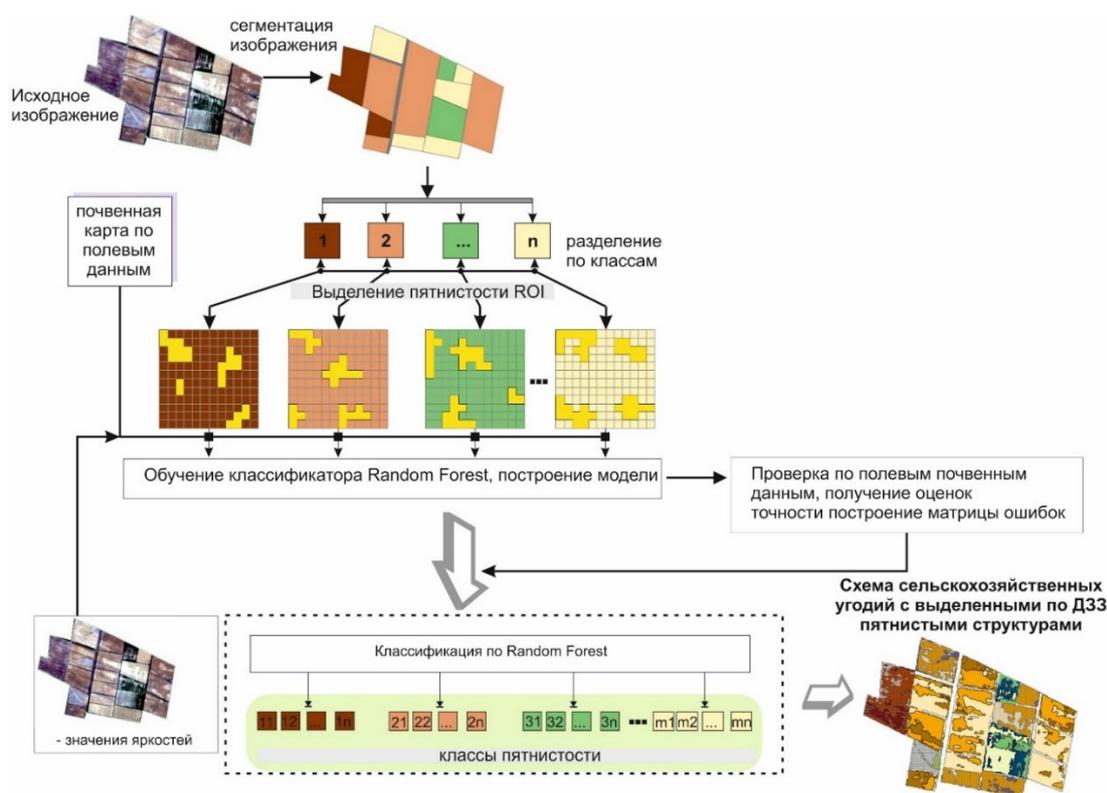


Рис. 3. Второй уровень классификации для дешифрирования окорбоначенных почв

Для регрессионного анализа на участке Светлый Яр использовалась выборка из 350 значений пикселей и 31 признака (СКЯ, индексы). Для создания выборки принимались значения пикселей, попадающие в окрестность полигона, построенного вокруг точки отбора пробы. При этом полигон строился таким образом, чтобы попадающий в него уча-

сток был максимально однородным. Для оценки достоверности полученных результатов классификации космических изображений составлена матрица ошибок (таблица). По диагонали матрицы идут значения, указывающие на долю правильно классифицированных пикселей, значения вне диагонали – ошибки 1-го и 2-го родов.

Матрица ошибок, где 1, 2, 3а, 3б, 4, 5, 6, 7 – классы природных объектов

	1	2	3а	3б	4	5	6	7	...
1	0,764970	0,205950	0,030590	0,004850	0,024989	0	0,043630	0,011981	0,051899
2	0,076220	0,725690	0,012640	0,001940	0,006181	0	0,012270	0,006879	0,001006
3а	0,005400	0,000190	0,767260	0	0,010243	0	0,000014	0,000567	0,0000437
3б	0,000014	0	0,000630	0,667310	0,024283	0	0,003310	0,001417	0,0000219
4	0,003480	0,002870	0,032490	0,109600	0,790110	0,25	0,018070	0,010356	0,001378
5	0	0	0,000250	0	0,006181	0,736840	0,000042	0,0000567	0
6	0,031940	0,022660	0,100130	0,158100	0,063929	0	0,816230	0,028629	0,025217
7	0,003870	0,004180	0,020990	0,029100	0,030022	0	0,016140	0,781190	0,005730
...	0,012580	0,001170	0,001900	0,000970	0,012539	0	0,034910	0,012604	0,763051

### Результаты

Предложенный метод апробирован при изучении почв на территории Волго-Донской ОС, расположенной в Волгоградской области. Экспериментальная работа выполнялась совместно с сотрудниками почвенного института им. В. В. Докучаева. В качестве материалов ДЗЗ использовались разновременные мультиспектральные снимки, полученные со спутников Sentinel-2 за 27.02.2020, 29.04.2020, 28.06.2020, 26.07.2020 и 20.08.2020 в четырех каналах (R, G, B, NIR) и космический снимок со спутника Landsat-8 (04.04.2020) в восьми каналах. При анализе космических снимков (территория центральной части Волго-Донской ОС) про-

дилось визуальное дешифрирование структуры сельскохозяйственных угодий, измерения спектральной яркости на полях с разными культурами в четырех каналах: 1 – голубой (0,4–0,5 мкм), 2 – зеленый (0,5–0,6 мкм), 3 – красный (0,6–0,7 мкм) и 4 – ближний инфракрасный (0,7–0,95 мкм), строились спектральные графики и рассчитывались вегетационные индексы (NDVI), использовались различные сочетания каналов и классификация изображения снимка по значениям NDVI [33]. На рис. 4 представлены фрагменты снимков космической съемки, выполненной в феврале и марте 2020 г. На них по мере вегетации культур визуально выделены возделываемые сельскохозяйственные культуры и общая структура полей.



Рис. 4. Космическое изображение сельскохозяйственных угодий центральной части Волго-Донской ОС (Волгоградская область) со спутника Sentinel-2:

а) снимок Sentinel-2, дата съемки 27.02.2020; б) снимок Sentinel-2, дата съемки 28.03.2020. Условные обозначения: 1, 1а – озимые зерновые, 7 – многолетняя залежь

В результате автоматизированного распознавания получены индексированные изображения, представленные на рис. 5.

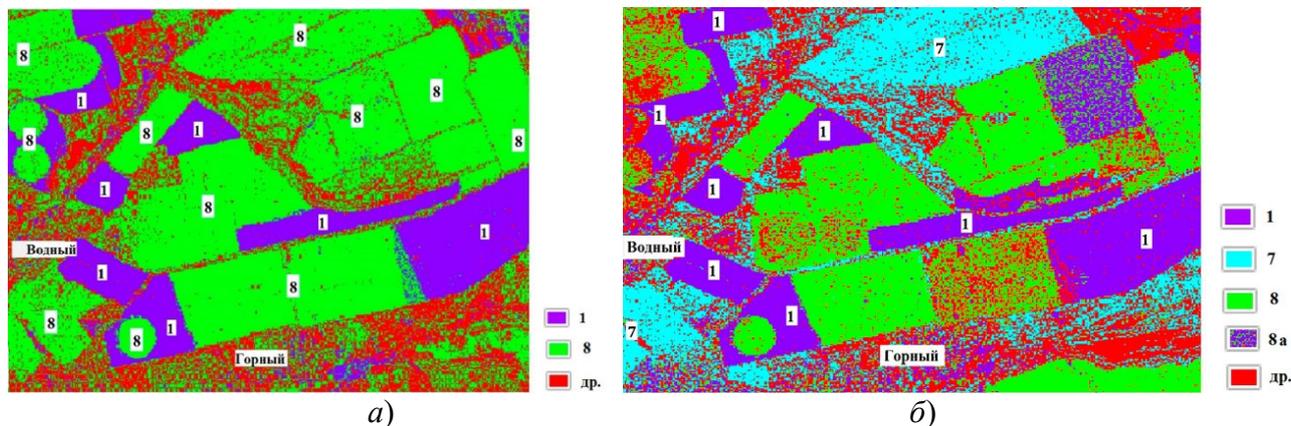


Рис. 5. Результат последовательной автоматизированной обработки космических изображений со спутника Sentinel-2 на основе классификатора RandomForest и выделение сельскохозяйственных угодий центральной части Волго-Донской ОС (Волгоградская область) за период:  
а) 27.02.2020; б) 28.03.2020

Последовательная автоматизированная классификация космических изображений показала, что выделение структуры сельскохозяйственных земель возможно, однако следует учитывать, что поля малой площадью не всегда выделяются, а поля под парами из-за разности во влажности почв могут быть представлены несколькими классами и на заключительном этапе составления карты структуры сельскохозяйственных угодий требуют своего объединения. Доля правильно классифицированных пикселей для всех анализируемых сельскохозяйственных полей в среднем составила 0,75. Классы природных объектов для удобства были закодированы: 1, 1а – озимые зерновые, 2 – яровые зерновые, 3а – суданская трава на богарном поле, 3б – суданская трава под орошением, 4 – кукуруза на силос, 5 – соя, 6 – пары, 7 – многолетняя залежь.

Окончательным этапом стала постклассификация и создание карты «Распределения окарбоначивания на участок Светлоярской оросительной системы» (рис. 6).

Белые пятна на снимке – это пиксели, которые не были отнесены ни к какому классу. Их наличие связано с присутствием шумов на изображении.

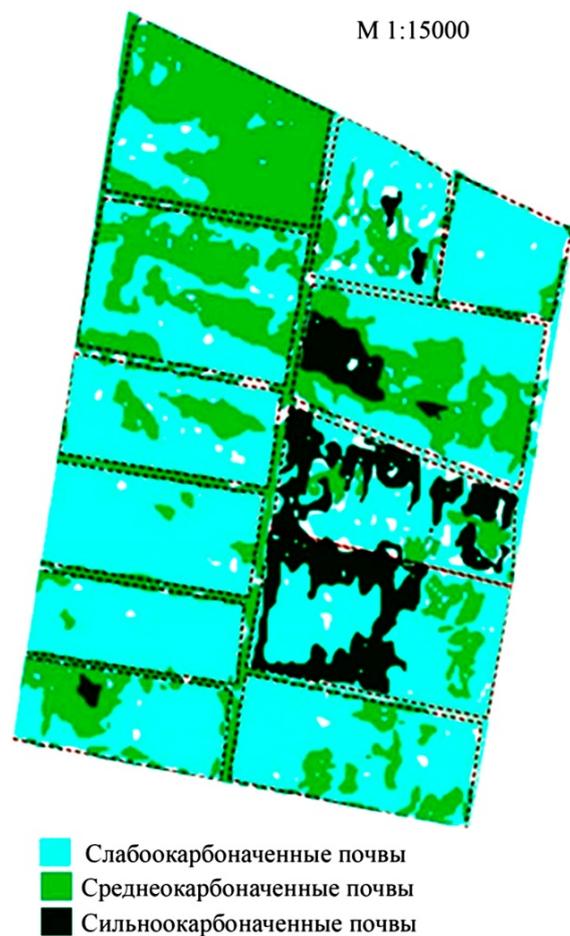


Рис. 6. Распределения окарбоначивания на тестовом участке

На Светлоярском участке большая часть полевых точек была сосредоточена на полях с люцерной. Поэтому для данного участка задача состояла в использовании зависимости спектральных характеристик люцерны от состояния окарбонирования почвы.

Сначала выбиралась регрессионная модель из нескольких предложенных. Среди них: линейная, МНК, SVM, гребневая и «случайный лес». Выбор регрессионной модели основывался на критериях точности:  $R^2$  (коэффициент детерминации), СО, СКО. Чем выше  $R^2$  и ниже СКО, тем сильнее зависимость между переменными и прогнозируемым значением; в нашем случае – между СКЯ, спектральными индексами и значениями окарбонирования. На основе этих критериев «случайный лес» оказался наиболее надежной моделью, так как имел наиболее высокий коэффициент детерминации  $R^2$ , а также показывала наименьшие СКО и СО (рис. 7). Поэтому она использовалась для прогноза уровня окарбонирования.

Для Светлоярского участка наибольший вклад в зависимость давали вегетационные индексы: IPVI, SAVI, SI1, SI2, SI3, SI4, SI7, SI9, SI10, SI11, VSSI, HI, BI [36–39]. Они использовались для дальнейшей классификации. Предварительно значения окарбонирования в пробах были разбиты на три класса: 1–4 ммоль/г – слабоокарбонированные, 4–8 ммоль/г – среднеокарбонированные, более 8 ммоль/г – сильноокарбонированные соответственно. Для классификации была использована модель «Случайный лес». На этапе обучения классификатора использовалась выборка, скорректированная после регрессионного анализа. Выборка разбивалась на тренировочный и тестовый наборы, где для тестирования использовалось 30 % выборки. Для проверки точности классификации в качестве критерия использовалась кросс-валидация с разбиением выборки на пять частей.

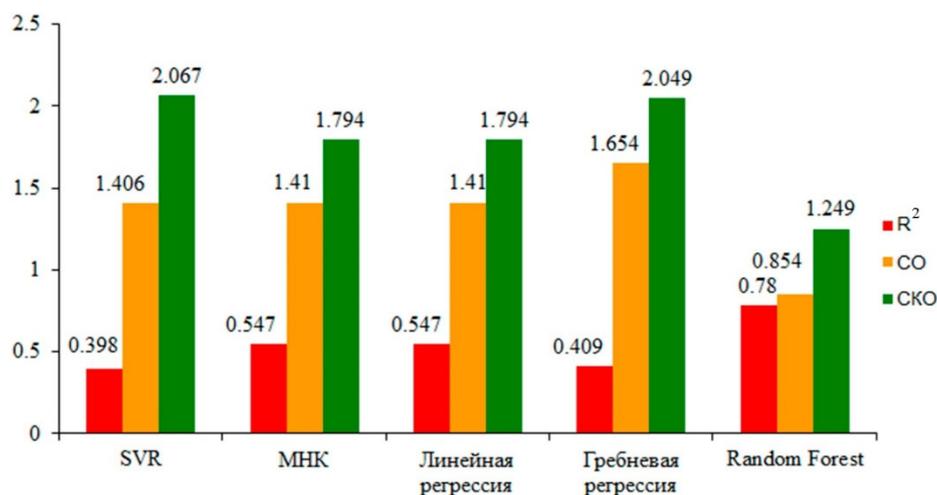


Рис. 7. Диаграмма оценки точности регрессионного анализа для участка Светлый Яр,  $R^2$  – коэффициент детерминации), СО – стандартное отклонение, СКО – среднее квадратическое отклонение

Проверка точности результатов на основе кросс-валидации с разбиением выборки на 5 частей дала следующий результат: 0,77096, 0,91666, 0,9481, 0,9385, 0,8666

### Обсуждение

На основе проведенного регрессионного анализа полевых данных и яркостей пикселей спутниковых изображений были определены

оптимальные признаки для выявления окарбонированных земель по материалам мультиспектральной космической съемки. С использованием классификаторов, обученных на отобранных признаках, были составлены карты тестовых уровней окарбонирования на участках. Несомненно, для повышения достоверности результатов выявления участков окарбонирования необходимо увеличить количество точек полевого апробирования с их пространствен-

ной привязкой с помощью ГНСС-приемников. В дальнейшем для развития данного исследования также необходимо увеличить количество используемых разновременных мультиспектральных материалов дистанционного зондирования, чтобы иметь возможность оценить степень влияния погодных условий на получаемые результаты.

### Заключение

В ходе проведенных исследований выполнен анализ методов определения окарбонирования, используемых отечественными и зарубежными авторами. Основная часть существующих методов исследована и апробирована на тестовом участке с использованием полевых наблюдений. В результате апробации выбраны наиболее оптимальные методические подходы определения участков окарбонирования на участке Светлоярской оросительной системы. По результатам исследований решены следующие задачи: проанализи-

рованы зарубежные и отечественные источники, в которых освещались аналогичные исследования; составлена таблица дешифровочных признаков окарбонирования; проведена подготовка материалов ДЗЗ; определены методические подходы компьютерной обработки аэрокосмических снимков, которые позволяют оперативно проводить дешифрирование окарбонирования на участках работ Светлоярской оросительной системы; составлены цифровые карты для двух участков: Светлый Яр и Червленое; на основе цифровой обработки полевых данных выявлена качественная зависимость между уровнем окарбонирования почв и спектральной яркостью в каналах мультиспектрального изображения, полученного со спутника Ресурс-П. Предполагается, что полученные результаты обеспечат на этапе дальнейших исследований разработку перспективных методов цифровой обработки данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ливенгаупт А. И. Опыт применения аэрофотосъемки при изучении Днепровских плавень // Материалы по проблеме Нижнего Днепра. – 1931. – Т. 2. – С. 143–152.
2. Селяков Л. Я. Из опыта Казахской съемки // Геодезист. – 1932. – № 5. – С. 34–41.
3. Сметанин И. С. Из опыта использования материалов аэрофотосъемки при почвенных исследованиях // Почвоведение. – 1940. – № 12. – С. 66–72.
4. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. – М. : АН СССР, 1947. – 272 с.
5. Савин И. Ю., Симакова М. С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 5. – С. 104–115.
6. Ключко Т. А. Исследование современного состояния проблем выявления засоленных почв по данным космических съемок // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия География. – 2010. – Т. 23 (62), № 2. – С. 156–166.
7. Виноградов Б. В. Аэрофотосъемка и картография растительности на международной конференции в Тулузе // Геоботаническое картографирование. – 1966. – С. 70–74.
8. Виноградов Б. В. Применение дистанционной индикации для изучения Биосферы // Геоботаническое картографирование. – 1977. – С. 84–87.
9. Виноградов Б. В. Разработка фотометрического метода дешифрирования для автоматизации картирования растительности по аэрофотоснимкам // Геоботаническое картографирование. – 1963. – С. 30–36.
10. Панкова Е. И. Засоление почв аридных территорий и методы их дистанционного изучения в целях мониторинга: автореф. дисс. ... доктора сельскохозяйственных наук. – М. : Почвенный институт имени В. В. Докучаева, 1988. – 52 с.
11. Панкова Е. И., Мазиков В. М. Оценка засоления орошаемых почв хлопковых полей по аэрофотоснимкам (на примере Голодной степи) // Почвоведение. – 1976. – № 5. – С. 55–56.
12. Петерсон У., Нидьсон Т. Линейные комбинации коэффициентов спектральной яркости для анализа ландшафта // Ученые записки Тартуского государственного университета. – 1988. – № 808. – С. 34–45.

13. Скрипчинский А. В. Мониторинг эрозионных процессов средствами космической съемки // Наука. Инновации. Технологии. – 2016. – № 2. – С. 89–98.
14. Симакова М. С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам // Бюллетень почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2014. – Вып. 74. – С. 3–19.
15. Симакова М. С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам // Бюллетень почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2014. – Вып. 74. – С. 3–19.
16. Metternicht G. I., Zinck J. A. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints // Remote Sensing Environment. – 2003. – Vol. 85. No. 1. – P. 1–20.
17. Nield S. J., Boettinger J. L., Ramsey R. D. Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data // Soil Science Society of America Journal. – 2007. – Vol. 71, No. 1. – P. 245–252.
18. Shrestha D. P., Farshad A. Mapping salinity hazard: an integrated application of remote sensing and modeling-based techniques // Remote sensing of soil salinization. Impact on land management. – 2009. – No. 1. – P. 257–272.
19. Singh A. N., Dwivedi R. S. Delineation of salt-affected soil through digital analysis of Landsat MSS data // International Journal of Remote Sensing. – 1989. – Vol. 10, No. 1. – P. 83–92.
20. Савин И. Ю., Отаров А., Жоголев А. В. и др. Выявление многолетних изменений площади засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2014. – № 74. – С. 49–65.
21. Fernandez-Buces N., Siebea C., Cramb S., Palacio J. L. Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texaco, Mexico // Journal of Arid Environments. – 2006. – Vol. 65, No. 4. – P. 644–667.
22. Masoud A. A., Koike K. Arid land salinization detected by remotely-sensed land cover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt // Journal of Arid Environments. – 2006. – Vol. 66, No. 1. – P. 151–167.
23. Беленко В. В. Анализ данных дистанционного зондирования (ДДЗ), применяемых для ландшафтно-экологического картографирования // Молодой ученый. Ежемесячный научный журнал. – 2009. – № 10. – С. 34–37.
24. Кравченко Е. И. Факторы засоления почв участков «Червленое» и «Дубоображый» Светлоярской оросительной системы // Бюллетень почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2019. – Вып. 99. – С. 47–61.
25. Будажапова М., Шалова Л. Стандарты в области качества почв: реальность, направления, перспективы // Стандарты и качество. – 2015. – № 7 (937). – С. 58–60.
26. Караванова Е. И. Оптические свойства почв и их природа. – М., 2003 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://soil.msu.ru/attachments/article/1366/Оптические%20свойства%20почв.pdf>.
27. Лисецкий Ф. Н., Маринина О. А., Терехин Э. А. Опыт комплексного картографирования разновременных залежей на щебнистых почвах в сельской округе Керкинитиды // Проблемы истории, филологии, культуры. – 2016. – № 2. – С. 227–246.
28. Горохова И. Н., Панкова Е. И. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // Аридные экосистемы. – 2017. – Т. 23, № 3 (72). – С. 44–54.
29. Горохова И. Н., Авдеева Т. Н., Панкова Е. И., Прокопьева К. О. Почвенно-агрохимическая характеристика Светлоярского орошаемого участка в Волгоградской области // Аридные экосистемы. – 2019. – Т. 25, № 1 (78). – С. 49–60.
30. Савельев А. А., Григорьян Б. Р., Добрынин Д. В., Мухарамова С. С., Кулагина В. И., Сахабиев И. А. Оценка почвенного плодородия по данным дистанционного зондирования Земли // Ученые записки Казанского университета. – 2012. – Т. 154, кн. 3. – С. 158–172.
31. Кротов Д. Г., Самсонова В. П., Кротова Е. А., Лавринова Е. Ю. Связь между содержанием гумуса в пахотном горизонте серой лесной почвы и яркостью в красном канале спутникового изображения // Агрохимический вестник. – 2017. – № 1. – С. 11–14.
32. Солоха М. А. Определение агрохимических показателей почвы на основе аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата // Почвоведение и агрохимия. – 2018. – № 1 (60). – С. 67–76.
33. Патент № 2 497 112 Российская Федерация. Способ дистанционного определения деградации почвенного покрова, В. Г. Бондур, А. Б. Мурынин, В. Ф. Давыдов, К. Ю. Гороховский; заявитель и патентообладатель ФГБН учреждение «Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос». – 2012123643/28, заявл. 08.06.2012; Опубл. 27.10.2013. – Бюл. № 30

34. Горохова И. Н., Филиппов Д. В. Применение геоинформационных технологий и материалов космической съемки для мониторинга орошаемых земель Светлоярской оросительной системы (Волгоградская область) // Исследования Земли из космоса. – 2017. – № 4. – С. 79–87.

35. Горохова И. Н., Панкова Е. И., Шишконокова Е. А. Опыт использования космических снимков для составления карты землепользования орошаемых и залежных земель Светлоярской оросительной системы // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2017. – Вып. 89. – С. 68–86.

36. Братков В. В., Кравченко И. В., Туаев Г. А., Атаев З. В., Абдулжалимов А. А. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа // Известия ДГПУ. – 2016. – Т. 10, № 4. – С. 97–111.

37. Соромотин А. А., Бродт Л. В. Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки LANDSAT // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 37–49.

38. Белоусова А. П. Применение вегетационных индексов при анализе использования пахотных угодий (на примере Уинского района Пермского края) // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 208–218.

39. Хлебникова Е. П. Использование геопространственных данных для решения задач мониторинга особо охраняемых природных территорий // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 96–104.

### Об авторах

Дмитрий Викторович Филиппов – кандидат технических наук, директор.

Иван Николаевич Чурсин – младший научный сотрудник.

Даниил Дмитриевич Рулёв – младший научный сотрудник.

Алина Дмитриевна Бояренкова – младший научный сотрудник.

Получено 23.05.2022

© Д. В. Филиппов, И. Н. Чурсин, Д. Д. Рулёв, А. Д. Бояренкова, 2023

## Implementation of complex methods of earth's remote sensing data processing for studying carbonation processes of soils with artificial irrigation

*D. V. Filippov<sup>1</sup>, I. N. Chursin<sup>1\*</sup>, D. D. Rulev<sup>1</sup>, A. D. Boyarenkova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Geoinformation Research Centre (NGIC) Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russian Federation

\* e-mail: gislab@ngic.ru

**Abstract.** The article represents methodical research of carbonation processes of agricultural lands based on Earth's remote sensing data. The research is carried out on the territory of Svetloyarsk irrigationsystem located in Volgograd region. The article considered a set of methodical approaches for complex digital processing of multispectral space survey data and field results. The material on the deciphering features of carbonized lands is generalized and the relationship between the spectral brightness of pixels and the level of carbonation in the fields is established using scatter diagrams. Methods for collecting field data for complex processing together with high-resolution satellite images are determined. The test plots of soils are identified by the level of carbonation with their graphical display on cartographic schemes. The reliability of identifying zones of pixel display of carbonated agricultural lands was determined at the level of 75 %.

**Keywords:** multispectral survey, carbonate enrichment, irrigation system, space imagery

### REFERENCES

1. Livengaupt, A. I. (1931). Experience in the use of aerial photography in the study of the Dnieper floodplains. *Materialy po probleme Nizhnego Dnepra [Materials on the Problem of the Lower Dnieper]*, 2, 143–152 [in Russian].

2. Selyakov, L. Ya. (1932). From the experience of Kazakhstan survey. *Geodezist [Geodesist]*, 5, 34–41 [in Russian].

3. Smetanin, I. S. (1940). From the experience of using aerial photography materials in soil studies. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*, 12, 66–72 [in Russian].
4. Krinov, E. L. (1947). *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovaniy [Spectral reflectivity of natural formations]*. Moscow: AN SSSR Publ., 272 p. [in Russian].
5. Savin, I. Yu., & Simakova, M. S. (2012). Satellite technologies for inventory and monitoring of soils in Russia. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 9(5), 104–115 [in Russian].
6. Klochko, T. A. (2010). Study of the current state of the problems of identifying saline soils according to satellite imagery data. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Seriya Geografiya [Scientific Notes of the Taurida National University named after V. I. Vernadsky. Geography Series]*, Vol. 23(62), No. 2, 156–166 [in Russian].
7. Vinogradov, B. V. (1966). Aerial photography and vegetation cartography at the international conference in Toulouse. *Geobotanicheskoe kartografirovanie [Geobotanical Mapping]*, P. 70–74 [in Russian].
8. Vinogradov, B. V. (1977). Application of remote indication for studying the Biosphere. *Geobotanicheskoe kartografirovanie [Geobotanical Mapping]*, P. 84–87 [in Russian].
9. Vinogradov, B. V. (1963). Development of a photometric deciphering method for automating vegetation mapping from aerial photographs. *Geobotanicheskoe kartografirovanie [Geobotanical Mapping]*, P. 30–36 [in Russian].
10. Pankova, E. I. (1988). Salinization of soils of arid territories and methods of their remote study for monitoring purposes. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Moscow: Soil Institute named after V. V. Dokuchaev Publ., 52 p. [in Russian].
11. Pankova, E. I., & Mazikov, V. M. (1976). Assessment of salinity in irrigated soils of cotton fields from aerial photographs (on the example of the Hungry Steppe). *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*, 5, 55–56 [in Russian].
12. Peterson, W., & Nidson, T. (1988). Linear combinations of spectral brightness coefficients for landscape analysis. *Uchenye zapiski Tartuskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific Notes of Tartu State University]*, 808, 34–45 [in Russian].
13. Skripchinsky, A. V. (2016). Monitoring of erosion processes by means of satellite imagery. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii [Science. Innovation. Technologies]*, 2, 89–98 [in Russian].
14. Simakova, M. S. (2014). From visual interpretation of aerial photographs and field mapping of soils to automated interpretation and mapping from space images. *Byulleten' pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva [Dokuchaev Soil Bulletin]*, 74, 3–19 [in Russian].
15. Simakova, M. S. (2014). From visual interpretation of aerial photographs and field mapping of soils to automated interpretation and mapping from space images. *Byulleten' pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva [Dokuchaev Soil Bulletin]*, 74, 3–19 [in Russian].
16. Metternicht, G. I., & Zinck, J. A. (2003). Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. *Remote Sensing Environment*, 85(1), 1–20.
17. Nield, S. J., Boettinger, J. L., & Ramsey, R. D. (2007). Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 245–252.
18. Shrestha, D. P., & Farshad, A. (2009). Mapping salinity hazard: an integrated application of remote sensing and modeling-based techniques. *Remote Sensing of Soil Salinization. Impact on Land Management*, 1, 257–272.
19. Singh, A. N., & Dwivedi, R. S. (1989). Delineation of salt-affected soil through digital analysis of Landsat MSS data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(1), 83–92.
20. Savin, I. Yu., Otarov, A., Zhogolev, A. V., & et al. (2014). Identification of long-term changes in the area of saline soils of the Shoulder irrigated massif using Landsat satellite images. *Byulleten' pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva [Dokuchaev Soil Bulletin]*, 74, 49–65 [in Russian].
21. Fernandez-Buces, N., Siebea, C., Cramb, S., & Palacio, J. L. (2006). Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texaco, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 65(4), 644–667.
22. Masoud, A. A., & Koike, K. (2006). Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt. *Journal of Arid Environments*, 66(1), 151–167.
23. Belenko, V. V. (2009). Analysis of remote sensing data (RSD) used for landscape-ecological mapping. *Molodoy uchenyy [Young Scientist]*, 10, 34–37 [in Russian].

24. Kravchenko, E. I. (2019). Soil salinization factors in the Chervlenoe and Duboovrazhny plots of the Svetloyarsk irrigation system. *Byulleten' pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva [Dokuchaev Soil Bulletin]*, 99, 47–61 [in Russian].
25. Budazhapova, M., & Shalova, L. (2015). Standards of soil quality: reality, directions, prospects. *Standarty i kachestvo [Standards and Quality]*, 7(937), 58–60 [in Russian].
26. Karavanova, E. I. (2003). Optical properties of soils and their nature. Moscow, 2003. Retrieved from <http://soil.msu.ru/attachments/article/1366/Оптические%20свойства%20почв.pdf> [in Russian].
27. Lisetsky, F. N., Marinina, O. A., & Terekhin, E. A. (2016). Experience of complex mapping of multi-temporal deposits on gravelly soils in the rural district of Kerkinitida. *Problemy istorii, filologii, kul'tury [Problems of History, Philology, Culture]*, 2, 227–246 [in Russian].
28. Gorohova, I. N., & Pankova, E. I. (2017). The nature of patchiness of irrigated soils of the dry steppe zone (on the example of the Svetloyarsk irrigation system). *Aridnye ekosistemy [Arid Ecosystems]*, Vol. 23, No. 3(72), 44–54 [in Russian].
29. Gorohova, I. N., Avdeeva, T. N., Pankova, E. I., & Prokopieva, K. O. (2019). Soil and agrochemical characteristics of the Svetloyarsk irrigated area in the Volgograd region. *Aridnye ekosistemy [Arid Ecosystems]*, Vol. 25, No. 1(78), 49–60 [in Russian].
30. Saveliev, A. A., Grigoryan, B. R., Dobrynin, D. V., Mukharamova, S. S., Kulagina, V. I., & Sakhabiev, I. A. (2012). Estimation of soil fertility according to the data of remote sensing of the Earth. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta [Proceedings of Kazan University]*, 154(3), 158–172 [in Russian].
31. Krotov, D. G., Samsonova, V. P., Krotova, E. A., & Lavrinova, E. Yu. (2017). The relationship between the humus content in the arable horizon of gray forest soil and the brightness in the red channel of the satellite image. *Agrokhimicheskii vestnik [Agrochemical Bulletin]*, 1, 11–14 [in Russian].
32. Solokha, M. A. (2018). Determination of agrochemical indicators of soil based on aerial photography from an unmanned aerial vehicle. *Pochvovedenie i agrokhimiya [Soil Science and Agrochemistry]*, 1(60), 67–76 [in Russian].
33. Bondur, V. G., Murynin, A. B., Davydov, V. F., & Gorokhovskiy K. Yu. Method for remote determination of soil degradation. Patent No. 2 497 112 Russian Federation [in Russian].
34. Gorohova, I. N., & Filippov, D. V. (2017). The use of geoinformation technologies and satellite imagery materials for monitoring irrigated lands of the Svetloyarsk irrigation system (Volgograd region). *Issledovaniya Zemli iz kosmosa [Research of the Earth from Space]*, 4, 79–87 [in Russian].
35. Gorohova, I. N., Pankova, E. I., & Shishkonakova, E. A. (2017). Experience in the use of space images for compiling a land use map of irrigated and fallow lands of the Svetloyarsk irrigation system. *Byulleten' pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva [Dokuchaev Soil Bulletin]*, 89, 68–86 [in Russian].
36. Bratkov, V. V., Kravchenko, I. V., Tuae, G. A., Ataev, Z. V., & Abdulzhalimov, A. A. (2016). The use of vegetation indices for mapping the landscapes of the Greater Caucasus. *Izvestiya DGPU [Dagestan State Pedagogical University Journal]*, 10(4), 97–111 [in Russian].
37. Soromotin, A. A., & Brodt, L. V. (2018). Vegetation cover monitoring during the development of oil and gas fields according to LANDSAT multi-zone survey data. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie [Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology]*, 4(1), 37–49 [in Russian].
38. Belousova, A. P. (2019). The use of vegetation indices in the analysis of the use of arable land (on the example of the Uinsky district of the Perm Territory). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 208–218 [in Russian].
39. Khlebnikova, E. P. (2020). Using geospatial data to solve the problems of monitoring specially protected natural areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(1), 96–104 [in Russian].

#### Authors details

Dmitry V. Filippov – Ph. D, Director.

Ivan N. Chursin – Junior Researcher.

Daniil D. Rulev – Junior Researcher.

Alina D. Boyarenkova – Junior Researcher.

Received 23.05.2022

© D. V. Filippov, I. N. Chursin, D. D. Rulev, A. D. Boyarenkova, 2023