

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ  
И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 631.4

**ВЫДЕЛЕНИЕ КАРБОНАТНЫХ ПОЧВ  
НА ВОЛГО-ДОНСКОЙ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ (ВОЛГОГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

© 2023 г. И.Н. Горохова\*, И.Н. Чурсин\*\*, Н.Б. Хитров\*, Н.К. Круглякова\*\*\*\*

*\*Почвенный институт им. В.В. Докучаева*

*Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., стр. 7. E-mail: g-irina14@yandex.ru*

*\*\*Научный геоинформационный центр РАН*

*Россия, 119019, г. Москва, а/я 168, ул. Новый Арбат, д. 11. E-mail: chursin.ivan93@gmail.com*

*\*\*\*Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия*

*Россия, 400002, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9. E-mail: kruglyakova02032013@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.12.2022. После доработки 01.02.2023. Принята к публикации 02.02.2023.

Исследование направлено на обоснование выделения ареалов карбонатных почв с использованием космической информации высокого разрешения (Pleiades) на территории ключевого участка опытной станции «Орошаемая» Волго-Донской оросительной системы, расположенной в Волгоградской области. Проблема с присутствием карбонатов в почвах связана с тем, что они оказывают как положительное, так и отрицательное воздействие на почвы, поэтому выявление таких почв практически важно. Выделение на космических снимках карбонатных пятен проводилось по точкам поверхностного вскипания почв разной степени от раствора HCl, которое выявлялось контактным способом на с/х полях. Далее осуществлялась установка связи между спектральной яркостью в разных каналах космического снимка в точках вскипания и степенью вскипания почв. Для этого с космических изображений делалась выборка из пикселей, соответствовавших точкам вскипания на поверхности почв на местности, которая использовалась при выделении классов на снимке с помощью алгоритма RandomForest. В результате всех проведенных исследований было определено, что для выделения ареалов карбонатных (вскипающих) с поверхности почв по космической информации оптимально проводить полевые измерения и использовать материалы съемки в засушливый сезон года (май-июль). При обработке снимка следует использовать изображение полей с открытой поверхностью почв и не вовлекать территории за пределами сельскохозяйственного освоения. Необходимо также исключать из выборки точки с луговато- и лугово-каштановыми почвами. Они расположены, как правило, в понижениях рельефа и из-за принесенных со стороны карбонатов могут создавать помехи в расчетах. Выделение ареалов карбонатных почв лучше всего проводить в рамках отдельного с/х поля или группы схожих по яркости полей. Разброс яркости с/х полей на космическом снимке возникает из-за разного вида использования земель (богара, орошаемое поле). При таком дифференцированном подходе точность классификации карбонатных почв по степени вскипания (нет, слабое, среднее и сильное) на космическом изображении достигает 0.75-0.90, в то время как при обработке ключевого участка целиком, возможно выделение карбонатных почв только с градацией сильное вскипание или нет вскипания с точностью 0.7. Новизна результатов работы заключается в обосновании возможности достоверного выделения поверхностно-карбонатных почв при совместном использовании материалов космической информации высокого разрешения и данных полевых исследований при условии соблюдения определенных требований.

*Ключевые слова:* карбонатные почвы, вскипание, степень вскипания почв, открытая поверхность, космические снимки, спектральная яркость, точность классификации, Волгоградская область.

**DOI: 10.24412/2542-2006-2023-1-66-91**

**EDN: SPYWFH**

Земельные ресурсы являются основным природным богатством Волгоградской области. По площади сельскохозяйственных угодий (8,7 млн. га) среди субъектов Российской Федерации она находится на третьем месте после Алтайского края и Оренбургской области. Волгоградская область относится к максимально освоенным территориям, где дальнейшее увеличение земель сельскохозяйственного назначения практически невозможно (Волгоградская область ..., 2011). Фактическое наличие основных видов сельскохозяйственных угодий установилось в начале 60-х гг. – после освоения целинных и залежных земель, а также широкого развития орошения, особенно масштабного в сухостепной зоне.

В дореволюционной России новое представление о географии почв степей внесли работы русских ученых Н.А. Димо и Б.А. Келлера (1907), Г.Н. Высоцкого (1915), которые показали пестроту растительного и почвенного покрова, связь почв с микрорельефом. Однако основные закономерности природного состояния почв сухостепной зоны в целинных условиях и на начальных этапах их активного сельскохозяйственного освоения установили советские ученые (Антипов-Каратаев, 1953; Иванова, 1928; Ковда, 1937; Роде, 1947; Иванова, Фридланд, 1954). Результатом обобщения многолетних исследований почв специалистами различных организаций явилась книга Е.Т. Дегтяревой и А.Н. Жулидовой «Почвы Волгоградской области» (1970).

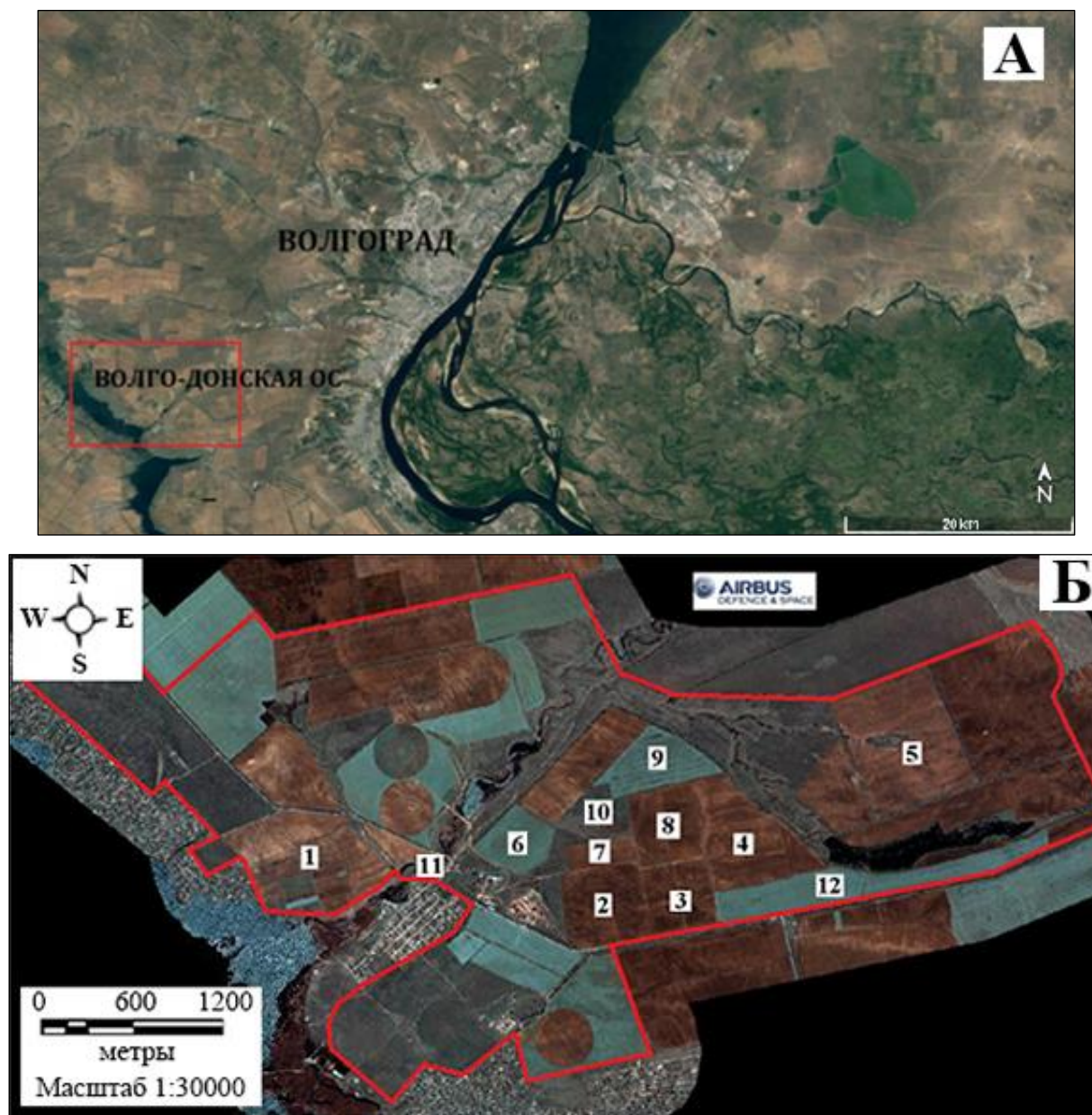
К классическим методам изучения почв с 60-х годов XX в. и по настоящее время активно добавляются такие, как дистанционное зондирование на основе аэро- и космической съемки с привлечением спутниковой информации высокого разрешения (Горохова и др., 2018; Wang F. et al., 2020; Wang J. et al., 2019), информации с беспилотных летательных аппаратов (Tian et al., 2020) и использование определяемых дистанционно таких параметров как индексы растительности, засоления и влажности почв, температуры поверхности, топографии; применение различных моделей расчета и картографирования почв, из которых наиболее востребованы: случайный лес (RF), множественная регрессионная модель (MLR), метод опорных векторов (SVM), искусственные нейронные сети (ANN) (Горохова и др., 2021; Tian et al., 2020; Wang F. et al., 2020; Zarea et al., 2020). Отмечается, что не существует алгоритма, который мог бы идеально работать для всего набора данных, поэтому выбирается тот, который соответствует конкретным целям и подходит для выбранного района исследования. Поэтому интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения особенностей района исследований на основе полевых работ и лабораторных анализов почвенных образцов (Горохова и др., 2021; Wang F. et al., 2020).

В 50-60-х годах XX века в Волгоградской области были построены крупные оросительные системы. Однако неправильная эксплуатация орошаемых земель вызвали к началу 1990-х годов подъем уровня грунтовых вод, подтопление, возникновение очагов вторичного засоления, осолонцевание почв и др. Как следствие, существенные площади орошаемых земель были заброшены и стали многолетней залежью, другая часть земель была переведена в богарное использование, а на сохранившихся орошаемых участках поменяли тип орошения (преимущественно, с поверхностного на дождевание или капельный). Затем начался период (1990-2010 гг.), который привел к понижению уровня грунтовых вод глубже 5 м и к частичному рассолению и ощелачиванию вторично засоленных почв на орошаемых землях. На этом фоне особенно ярко проявился процесс накопления карбонатов в поверхностном горизонте почв. Поскольку присутствие карбонатов оказывает существенное влияние на свойства почв (как положительное, так и отрицательное) обнаружить и выделить карбонатные пятна на орошаемых полях становится актуальной задачей.

Цель данной статьи – определение карбонатных пятен поверхностного вскипания почв на полях ключевого участка «Орошаемый» с привлечением космических снимков.

### Материалы и методы исследований

Объект изучения – Волго-Донская оросительная система (ОС), расположенная западнее г. Волгограда в сухостепной зоне Волгоградской области, на юге Приволжской возвышенности, спускающейся к Волго-Донскому каналу. Наши исследования проводились в границах занимающего центральную часть Волго-Донской ОС ФГБУ Опытная Станция «Орошаемая» (далее – опытная станция «Орошаемая»; рис. 1 А, Б).



**Рис. 1.** А – расположение Волго-Донской оросительной системы на космическом снимке с портала Google.Earth, 25.05.2021, Б – территория и поля на ключевом участке опытной станции «Орошаемая» в Волгоградской области со спутника Pleiades, 25.04.2020.

**Fig. 1.** А – Volgograd-Don irrigation system on a Google.Earth satellite image, 25/05/2021, Б – territory and fields of the key plot of the “Oroshayemaya” experimental station in the Volgograd Region, taken from the Pleiades satellite, 25/04/2020.

Опытная станция «Орошаемая» располагается на юге Приволжской возвышенности, вытянутой вдоль правого берега Волги. Эта территория представляет собой плато, расчлененное многочисленными речными долинами, оврагами и балками. Она имеет слабовыпуклую форму и очень постепенно опускается к бровкам долин. К югу от г. Волгограда Приволжская возвышенность переходит в возвышенность Ергени. Формирование рельефа Приволжской возвышенности происходило под воздействием интенсивного проявления новейших тектонических поднятий и эрозионных процессов.

Эта часть Приволжской возвышенности в плиоцене была полностью перекрыта «ергенинскими» отложениями, представленными песками с прослоями и линзами глин и песчаника, а затем в конце плиоцена и в четвертичном периоде они подверглись денудации. К настоящему времени здесь сохранился покров ергенинских осадков мощностью до 30-40 м и не утрачены черты плиоценовой аккумуляции. Приводораздельные участки сложены ергенинскими песками. Они перекрыты красно-бурыми скифскими глинами неопределенного генезиса и возраста (верхнеэоценовый, нижнечетвертичный), мощностью 3-50 м и толщей четвертичных лёссовидных суглинков, местами достигающей 50-70 м. Грунтовые воды залегают глубоко, как правило, они имеют низкую минерализацию и гидрокарбонатно-натриевый состав (Волгоградская область ..., 2011).

Юг Приволжской возвышенности относится к подзоне каштановых почв. Почвообразующие породы отличаются значительным разнообразием, что приводит к вариативности строения профиля почв и их свойств. Основными почвообразующими породами являются ергенинские пески, лёссовидные суглинки, местами красно-бурые скифские глины. Почвенный покров представлен почвенными комбинациями, включающими каштановые несолонцеватые почвы на приводораздельных пространствах, солонцовые комплексы с разным долевым участием каштановых почв и солонцов, собственно солонцы автоморфные, полугидроморфные и гидроморфные; сочетания и пятнистости лугово-каштановых, луговых почв разной степени засоления и солонцеватости; аллювиальные почвы в долинах рек (Дегтярева, Жулидова, 1970; Зинченко и др., 2020).

Орошение на опытной станции производится водой из Береславского и Варваровского водохранилищ, которые входят в систему Волго-Донского судоходного канала имени В.И. Ленина (Водохранилища, пруды и озера ..., 2020). В условиях субаридного климата высокий расход воды на испарение с поверхности водоемов способствует повышению минерализации воды в них (табл. 1).

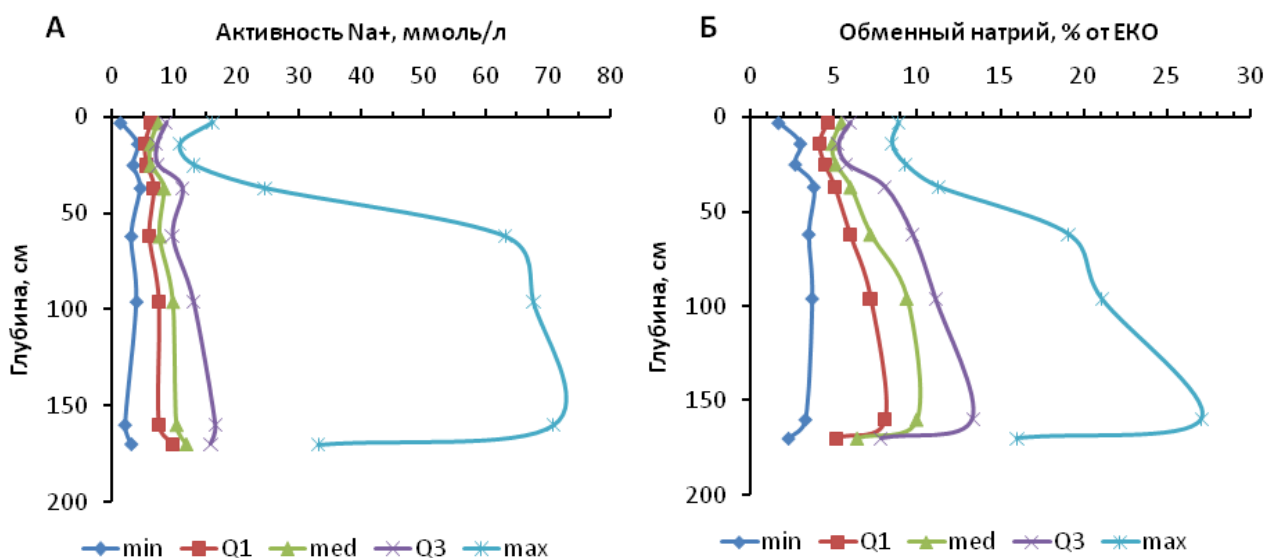
Прогнозное содержание обменного натрия в почве при поливе водами с указанными в таблице 1 значениями без учета концентрирования вод в почве составляют 5.1 и 4.4 % от емкости катионного обмена (ЕКО). Постоянное орошение слабоминерализованными водами из водохранилища с повышенной концентрацией ионов натрия в реальных условиях способствует усилению развития процесса вторичного осолонцевания почв, которое оценивается по содержанию обменного натрия в ЕКО более 5% (рис. 2).

Качество поливной воды и используемая дождевальная техника в сочетании с мезорельефом территории предопределили развитие таких деградационных процессов в орошаемых почвах, как вторичное осолонцевание, образование техногенной глыбистости, ирригационной эрозии, а также окарбоначивание поверхностных горизонтов. При этом вторичное осолонцевание, стимулируя развитие ирригационной эрозии, приводит к периодической припашке нижележащих карбонатных горизонтов и образованию дополнительной пятнистости поля по содержанию карбонатов в пахотном слое. Все это в комплексе приводит к возникновению неоднородности рисунка поверхности почвенного покрова на материалах дистанционного зондирования.

**Таблица 1.** Химический состав вод Береславского (1) и Варваровского (2) водохранилищ Волго-Донского канала, используемых для орошения (август 2020 г.). **Table 1.** Chemical composition of the water from the Bereslavsky (1) and Varvarovsky (2) irrigation reservoirs of the Volga-Don Canal, August 2020.

Водохранилище	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	M, г/л	SAR
		ммоль(экв)/л								
1	8.1	3.6	4.4	6.1	4.8	2.5	7.0	0.11	0.95	3.7
2	8.2	2.7	3.9	5.9	5.0	1.8	6.0	0.12	0.84	3.2

**Примечания к таблице 1:** M – минерализация воды, SAR – натриевое адсорбционное отношение, оценивает опасность осолонцевания,  $SAR = \frac{C_{Na}}{\sqrt{\frac{(C_{Ca} + C_{Mg})}{2}}}$ , где  $C_{Na}$ ,  $C_{Ca}$ ,  $C_{Mg}$  – концентрация ионов Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, ммоль(экв)/л (Richards, 1954). **Notes to Table 1:** M – water mineralization, SAR – sodium adsorption ratio that estimates the alkalization risks,  $C_{Na}$ ,  $C_{Ca}$ ,  $C_{Mg}$  – concentration of Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> ions, mmol(equiv)/L (Richards, 1954).



**Рис. 2.** Распределение непараметрических статистических показателей в почвенном профиле: А – активность ионов Na<sup>+</sup> в пастах с влажностью 40% (мас.) и Б – обменный натрий. *Условные обозначения:* min – минимум, med – медиана, max – максимум, Q1 и Q3 – нижний и верхний квартили. Объем выборки – 40 почвенных разрезов. **Fig. 2.** Distribution of non-parametric statistical indices in a soil profile: A – activity of Na<sup>+</sup> ions in pastes with a moisture content of 40% (wt.), Б – exchangeable sodium. *Legend:* min – minimum, med – median, max – maximum, Q1 and Q3 – lower and upper quartiles; sample size is 40 profiles.

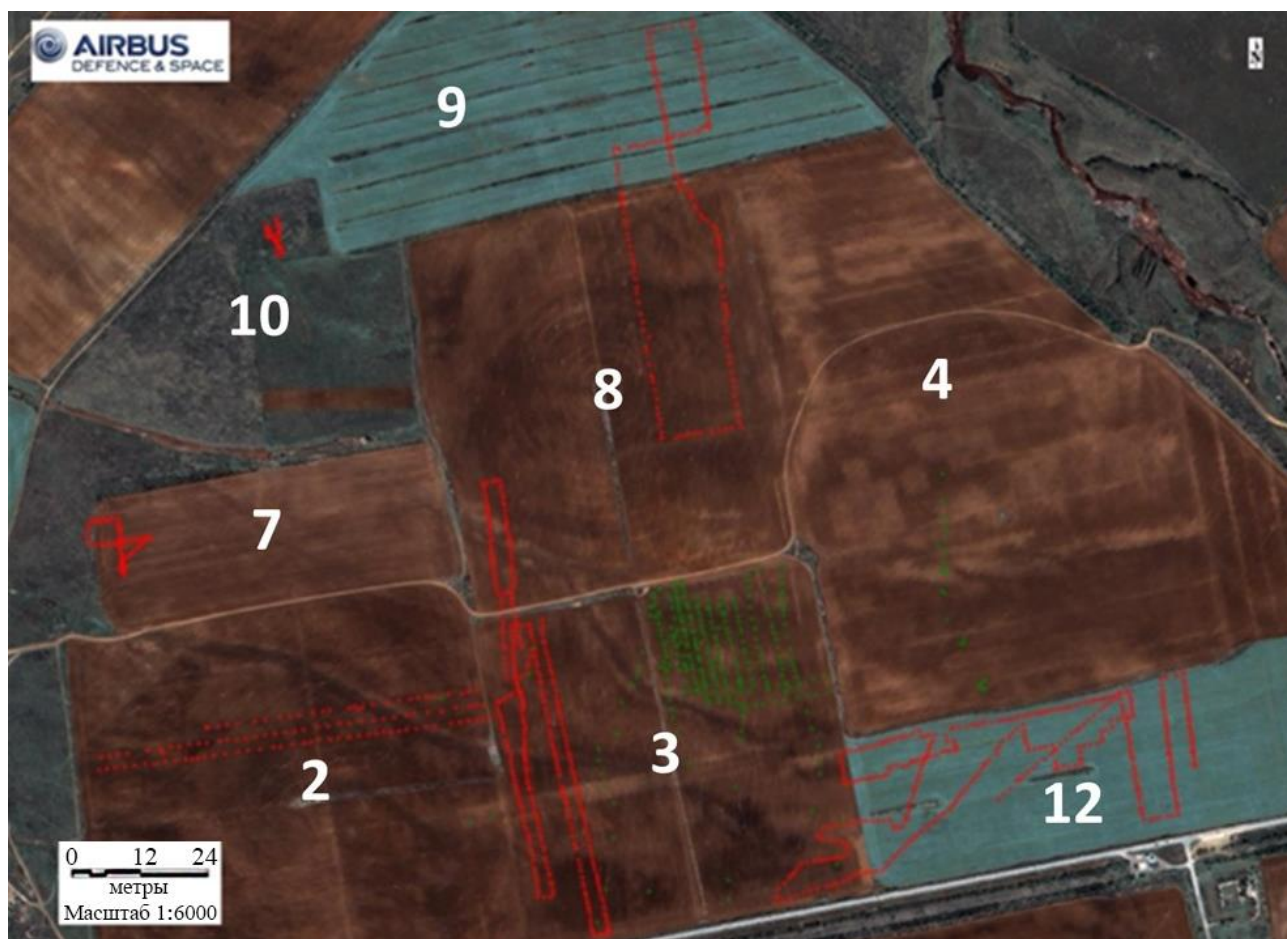
### Основные положения методики

Исследуемый ключевой участок – территория опытной станции «Орошаемая», которая состоит из нескольких полей. Всего обследовано 12 полей (рис. 1 Б, поля № 1-12), на которых точки опробования на вскипание и основные почвенные разрезы с описанием почв и отбором почвенных образцов закладывались по катене. В период обследования часть полей



орошалась (№ 2, 3, 8, 12, южная часть поля 1), другая была переведена в богарное использование после периода орошения (№ 4, 5, 6, 9, средняя часть поля 1), третья – все время использовалась в богаре (№ 10, северная часть поля 1).

Карбонатность – важная характеристика почв. Почвы, в которых в любом из горизонтов профиля присутствуют карбонаты щелочноземельных металлов в количестве 1% и более, относят к карбонатсодержащим почвам (Классификация ..., 2004). Карбонат кальция, присутствуя в почвах, оказывает сильное влияние на многие их свойства: щелочность, состав обменных катионов, физические свойства. Обнаружить и ориентировочно установить содержание карбонатов в полевых условиях можно по выделению углекислого газа (вскипанию) после взаимодействия почвы с 10% раствором HCl (Guidelines ..., 2006; Руководство ..., 2012). В полевых условиях при определении присутствия карбонатов оценивалась и степень вскипания по следующей градации: нет (вскипание отсутствует), слабое, среднее, сильное, локальное. Маршруты опробования поверхности почв на вскипание представлены на рисунке 3.



**Рис. 3.** Маршруты с точками определения вскипания почв с поверхности от 10% раствора HCl на с/х полях на территории опытной станции «Орошаемая», отмеченные на фрагменте космического снимка Pleiades, 25.04.2020. **Fig. 3.** Routes where the surface soil effervescence was determined on the cultivated fields, using the 10% solution of HCl, in the territory of the “Oroshayemaya” experimental station, marked on a fragment of the Pleiades satellite image, 25/042020.

Далее осуществлялась установка связи между спектральной яркостью в разных каналах (B1-B4) космического снимка Pleiades от 25.04.2020 в точках определения вскипания и степенью вскипания почв с поверхности, для того чтобы понять, изменяется ли степень вскипания почв в зависимости от ее спектральной яркости на снимке. Для этого с космических изображений была сделана выборка из пикселей, которые соответствуют точкам отбора почвенных проб на открытой местности. На основе такой выборки была составлена таблица (рис. 4).

В столбцах B1, B2, B3, B4 яркости пикселей даны в синем (Blue), зеленом (Green), красном (Red) и инфракрасном (NIR) каналах, а в столбце Class обозначена степень вскипания в соответствующей точке местности.

Затем строились диаграммы рассеяния яркости пикселей для всех каналов.

### Результаты и обсуждение

Чтобы оценить предварительно возможную взаимосвязь между степенью вскипания почв и значениями пикселей из полученной выборки, строились двумерные диаграммы рассеяния, где по осям откладывались значения пикселей в одном из четырех каналов (значения столбцов B1-B4). Всего было построено 6 диаграмм для каждой комбинации каналов: B1-B2, B1-B3, B1-B4, B2-B3, B2-B4, B3-B4. Если на таких диаграммах отдельные классы (выделены цветом) группируются вместе и не смешиваются с другими, то набор обладает хорошей линейной различимостью. В нашем случае все классы на диаграммах в основном перемешаны друг с другом, что говорит о плохой различимости по степени вскипания почв во всех каналах (рис. 4).

1	B1	B2	B3	B4	Class
2	747.0	1026.0	1417.0	2075.0	1
3	777.0	1027.0	1418.0	2108.0	2
4	858.0	1154.0	1594.0	2361.0	2
5	787.0	1032.0	1435.0	2069.0	2
6	811.0	1088.0	1471.0	2131.0	2
7	864.0	1194.0	1631.0	2406.0	2
8	825.0	1099.0	1470.0	2187.0	3
9	865.0	1164.0	1604.0	2402.0	3
10	816.0	1092.0	1511.0	2168.0	2
11	854.0	1168.0	1548.0	2468.0	2
12	801.0	1095.0	1506.0	2242.0	5
13	844.0	1099.0	1479.0	2203.0	4
14	816.0	1102.0	1492.0	2218.0	3
15	779.0	998.0	1285.0	1911.0	1
16	824.0	1059.0	1365.0	2015.0	5
17	781.0	1015.0	1291.0	1905.0	4
18	758.0	1010.0	1362.0	2019.0	5
19	777.0	1017.0	1305.0	1918.0	1
20	813.0	1035.0	1329.0	1985.0	5
21	737.0	930.0	1213.0	1782.0	5
22	751.0	963.0	1235.0	1834.0	4
23	809.0	1050.0	1379.0	2021.0	4

**Рис. 4.** Пример таблицы яркостей в каналах B1-B4 и степени вскипания почв в точках опробования, отмеченных на космическом снимке Pleiades, 25.04.2020. *Условные обозначения:* 1-5 в колонке «Class» – степень вскипания почв, где 1 – нет, 2 – слабое, 3 – среднее, 4 – сильное, 5 – локальное. **Fig. 4.** An example of a table of brightness of the B1-B4 channels and soil effervescence degree at the sampling plots from the Pleiades satellite image, taken on 25/04/2020. *Legend:* 1-5 in the “Class” column – the degree of soil effervescence, where 1 means no effervescence, 2 – weak, 3 – average, 4 – strong, 5 – local.

Для статистического подтверждения плохой или хорошей различимости пикселей и возможности выделения классов по всем каналам использован алгоритм RandomForest. При обучении алгоритма треть выборки оставлена для тестирования, которая не участвовала в обучении. Полученная статистическая модель оценивалась по следующим параметрам:

1. Матрица ошибок, как правило, используется для классификации несбалансированного набора данных. Она сравнивает фактические значения с прогнозными, предсказанными моделью машинного обучения. В матрице ошибок на диагонали отмечается количество правильно отнесенных пикселей к выделенным классам по степени вскипания почв, где 1 – нет вскипания, 2 – слабое вскипание, 3 – среднее, 4 – сильное, 5 – локальное, т.е. где прогнозные значения соответствуют фактическим значениям. Все, что расположено выше, является ложно-положительными результатами, а ниже – ложно-отрицательными. Из матрицы на рисунке 5 видно, что из набора данных для всего ключевого участка с открытой поверхностью почв классы 2, 3, 5 практически не выделяются, а в классах 1 и 4 правильно идентифицируется не более половины случаев (рис. 6, табл. 2).

2. Кросс-валидация – способ оценки модели, который предусматривает применение скользящего контроля или перекрестной проверки. В этом случае фиксируется некоторое множество разбиений исходной выборки на две подвыборки: обучающую и контрольную. Для каждого разбиения выполняется настройка алгоритма по обучающей подвыборке, затем оценивается его средняя ошибка на объектах контрольной подвыборки. Оценкой скользящего контроля называется средняя по всем разбиениям величина ошибки на контрольных подвыборках. По результатам кросс-валидации из набора данных для всего ключевого участка, где выборка разбивалась на 5 частей, точность классификации оказалась следующей: 0.430, 0.401, 0.441, 0.498, 0.507.

3. Точность – это доля правильных ответов модели в пределах класса относительно всех объектов, которые система отнесла к этому классу.

4. Полнота – это доля истинно положительных классификаций. Она показывает, какую долю объектов, реально относящихся к положительному классу, мы предсказали верно.

5. *F-мера*. В реальной жизни максимальная точность и полнота недостижимы одновременно, поэтому между ними приходится искать некий баланс. Необходим параметр, который объединял бы в себе информацию о точности и полноте алгоритма. Именно такой метрикой является *F-мера*, которая не зависит от соотношения классов, а потому применима в условиях несбалансированных выборок. *F-мера* представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Она стремится к нулю, если точность или полнота стремятся к нулю.

Макроусреднение, среднее арифметическое взвешенное характеризуют набор данных в целом.

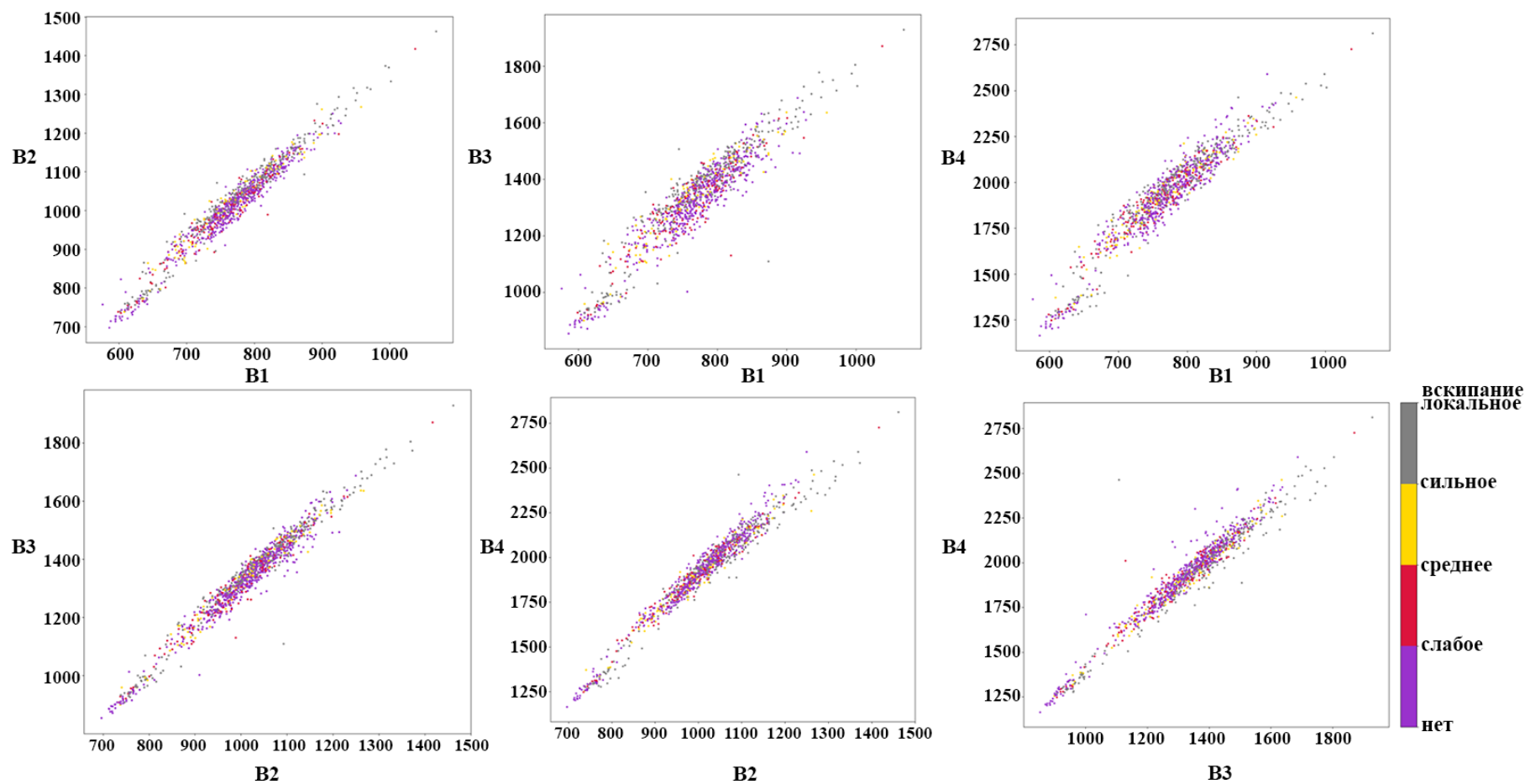
Показатели (метрики) классификации выборки из пикселей на снимке, соответствующие точкам опробования по вскипанию почв на ключевом участке, представлены в таблице 2.

Из приведенных расчетов видно, что точность классификации изображения ключевого участка по степени вскипания почв с поверхности не превышает 0.58, а значит, использовать такое классифицированное космическое изображение не имеет смысла.

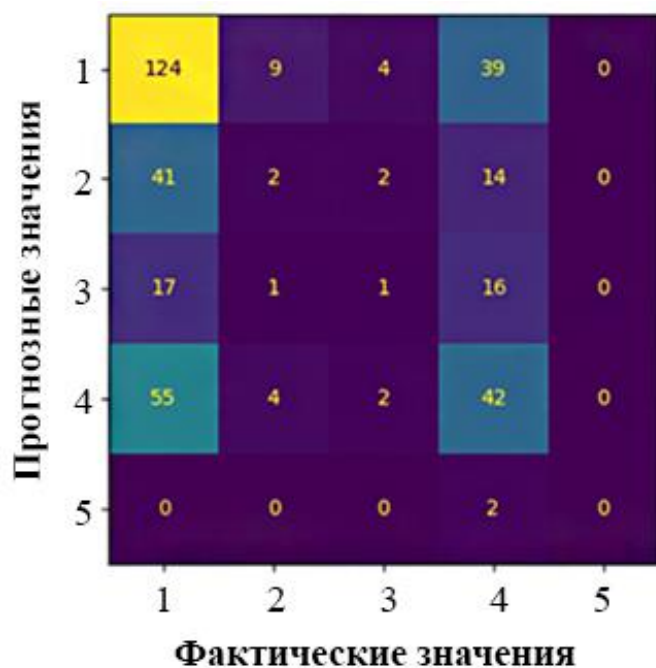
В следующем подходе проведем классификацию выборки по обобщенной характеристике вскипания почв «есть/нет», где она представлена более гармонично. Построим двумерные диаграммы рассеяния и оценим возможность выделения классов по всем каналам (рис. 7).

Из рисунка 7 видно, что точки разных классов на диаграммах перемешаны друг с другом, что говорит о плохой различимости выборки на 2 класса (есть/нет) по степени вскипания почв с поверхности во всех каналах.





**Рис. 5.** Диаграммы рассеяния яркости пикселей и степень вскипания почв (отражена цветом) в точках опробования на ключевом участке с открытой поверхностью почв в каналах Blue (B1), Green (B2), Red (B3), NIR (B4), составленные по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020.  
**Fig. 5.** Scatterplots of pixel brightness and soil effervescence degree (highlighted in color) at the sampling plots of the key area with an open soil surface in the Blue (B1), Green (B2), Red (B3) and NIR (B4) channels, based on a Pleiades satellite image taken on 25/04/2020.



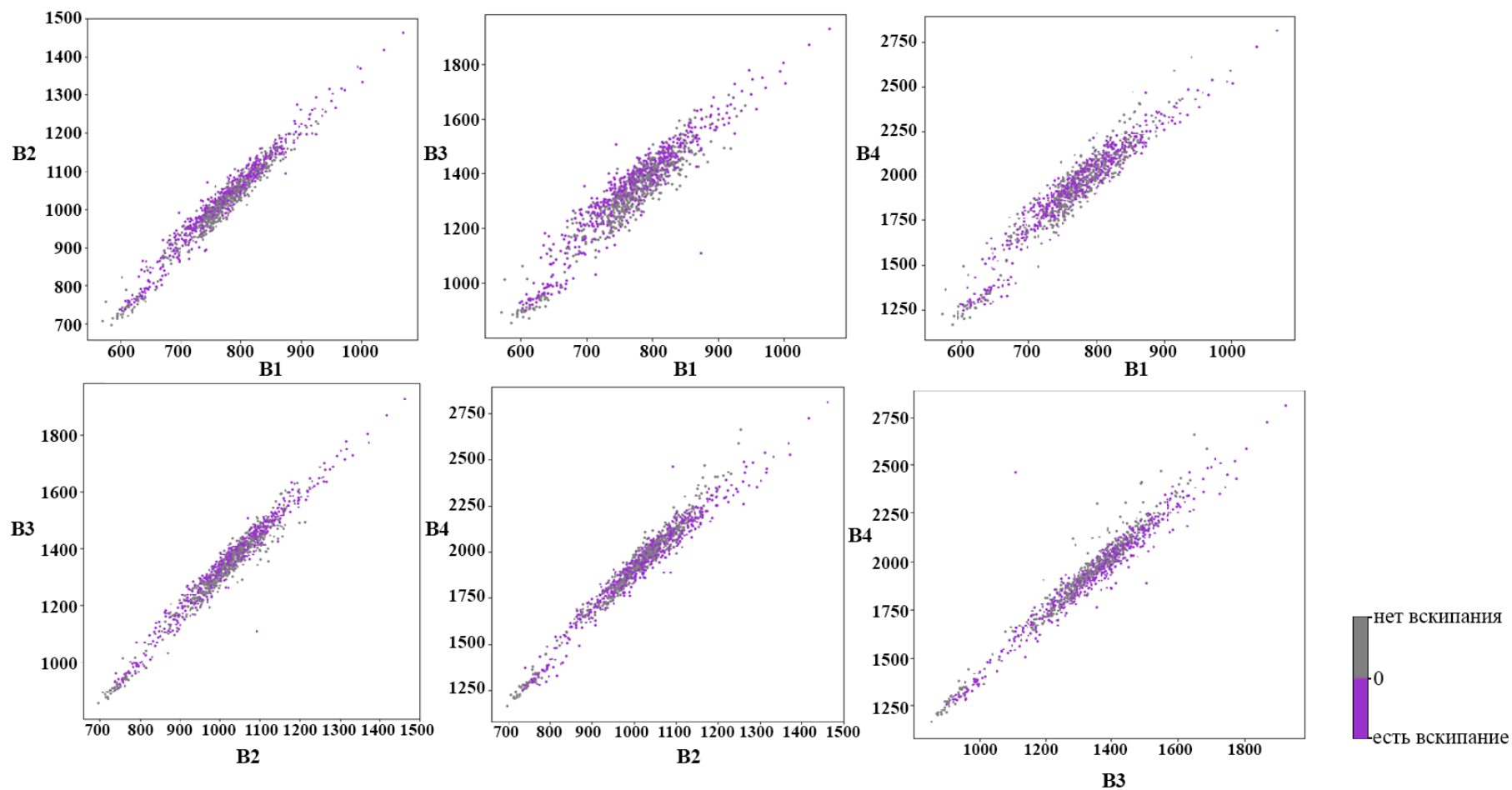
**Рис. 6.** Матрица ошибок классифицированного изображения ключевого участка по степени вскипания почв с поверхности по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020. *Условные обозначения:* 1 – нет вскипания, 2 – слабое вскипание, 3 – среднее, 4 – сильное, 5 – локальное. **Fig. 6.** Error matrix of the classified image of the key area for surface soil effervescence degree, based on the Pleiades satellite image, 25/04/2020. *Legend:* 1 – no effervescence, 2 – weak effervescence, 3 – average, 4 – strong, 5 – local.

**Таблица 2.** Статистические показатели классификации изображения ключевого участка по степени вскипания почв с поверхности с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020. **Table 2.** Statistical indices of the classification of the key area image, according to the degree of surface soil effervescence, using the Random Forest and the Pleiades satellite image, 25/04/2020.

Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – нет вскипания	0.52	0.7	0.6	176
2 – слабое вскипание	0.12	0.03	0.05	59
3 – среднее вскипание	0.11	0.03	0.05	35
4 – сильное вскипание	0.37	0.41	0.39	103
5 – локальное вскипание	0	0	0	2
Доля правильных ответов	–	–	0.58	379
Макроусреднение	0.58	0.58	0.58	379
Среднее арифметическое взвешенное	0.58	0.58	0.58	379

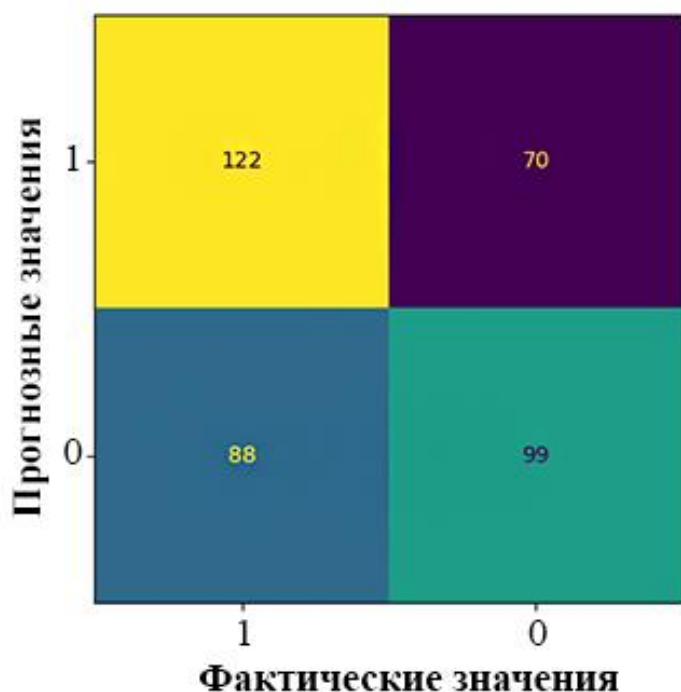
Матрица ошибок и статистические показатели (метрики), которые представлены на рисунке 8 и в таблице 3, показывают, что, хотя выборка стала более сбалансированной (192/187 пикселей), точность классификации изображения ключевого участка на 2 класса по вскипанию почв с поверхности (есть/нет) также не превысила 0.58.

Далее обработка выборки была проведена иным образом: из нее убрали значения яркостей луговатых- и лугово-каштановых почв, которые могут быть вскипающими с поверхности в результате намыва карбонатного материала с соседних участков, но за счет более высокого содержания гумуса имеют темный тон на снимке и вносят определенные помехи в расчеты.



**Рис. 7.** Диаграммы рассеяния яркости пикселей и вскипания почв (есть/нет) в точках опробования на ключевом участке с открытой поверхностью почв в каналах Blue (B1), Green (B2), Red (B3), NIR (B4), составленные по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020.

**Fig. 7.** Scatterplots of pixel brightness and soil effervescence (present/absent) at the sampling plots in the key area with an open soil surface, presented in the Blue (B1), Green (B2), Red (B3) and NIR (B4) channels and compiled using the Pleiades satellite image, 25/04/2020.



**Рис. 8.** Матрица ошибок классифицированного изображения ключевого участка по вскипанию почв с поверхности (есть/нет) по космическому снимку высокого разрешения Pleiades, 25.04.2020.  
**Fig. 8.** Error matrix of the classified image of the key area for surface soil effervescence (present/absent) based on the Pleiades satellite image, 25/04/2020.

**Таблица 3.** Статистические показатели классификации изображения ключевого участка по вскипанию почв с поверхности (есть/нет) с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020. **Table 3.** Statistical indices of the image classification of the key area for surface soil effervescence (present/absent) based on the Random Forest algorithm and the Pleiades satellite image, 25/04/2020.

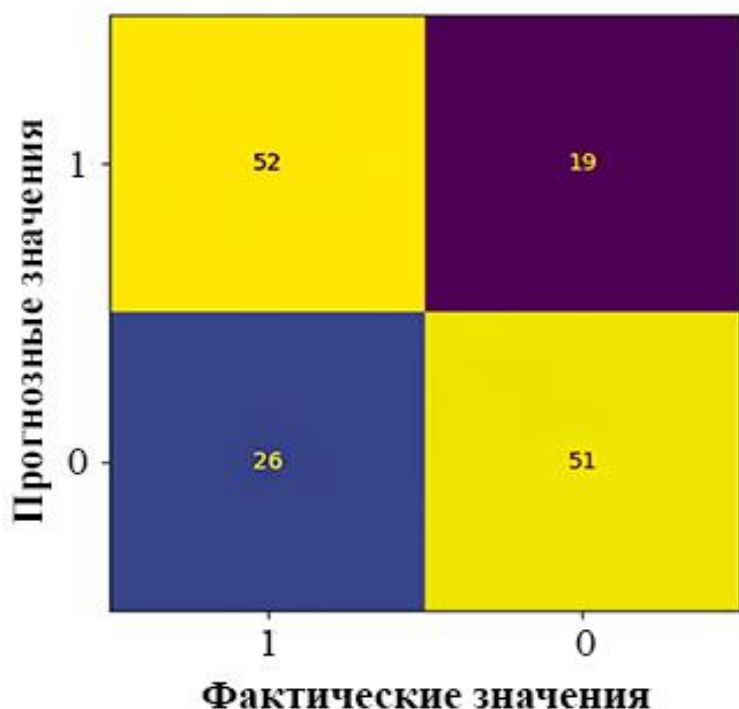
Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – есть вскипание	0.58	0.64	0.61	192
0 – нет вскипания	0.59	0.53	0.56	187
Доля правильных ответов	–	–	0.58	379
Макроусреднение	0.58	0.58	0.58	379
Среднее арифметическое взвешенное	0.58	0.58	0.58	379

Значения с локальным, слабым и средним вскипанием также были исключены и оставлены значения с сильным вскипанием и с отсутствием вскипания почв. Затем спектральные яркости точек были определены уже по другому снимку, взятому за теплый и сухой период (июль, 2020) года, RGB-изображению с портала Yandex (Pleiades, 28.06.2020). В результате получили следующую матрицу ошибок и статистические параметры (рис. 9, табл. 4).

Точность классификации изображения ключевого участка по вскипанию почв с поверхности при разделении на 2 класса (сильное вскипание/нет вскипания) составила 0.7. Таким образом, получается, что лучше использовать снимок за более сухой период съемки, чтобы влажность почвы не маскировала яркость пикселей и исключить из выборки луговато- и лугово-каштановые почвы, как более темные по тону на снимке и оставить для анализа только значения точек с отсутствием вскипания и сильным вскипанием почв.

При анализе космических изображений было замечено, что у полей с открытой

поверхностью почв наблюдались разные диапазоны яркостей в четырех каналах. Это дало возможность предположить, что поля исследуемой территории можно разбить на группы со схожими диапазонами яркости и проводить классификацию по группам или по отдельным полям внутри группы. При таком разбиении точность классификации по вскипанию с поверхности почв должна существенно повыситься. Для такого подхода был взят снимок Pleiades (25.04.2020) и исключены из процесса обработки поля с вегетирующей культурой и за пределами сельскохозяйственного освоения. Далее были построены диаграммы рассеяния, которые представлены на рисунке 10, где цветом показаны совпадение диапазонов яркости полей (А) и различия (Б). Исходя из таких диаграмм, мы определили следующие схожие по яркости на снимке группы полей: 1) 1, 5; 2) 2, 3, 8; 3) 4, 7. Исключены из сравнения поля № 6, 9 и 12, поскольку в это время они находились под вегетирующими культурами; поле 10 является залежью, а участок 11 – долиной балки (рис. 1).

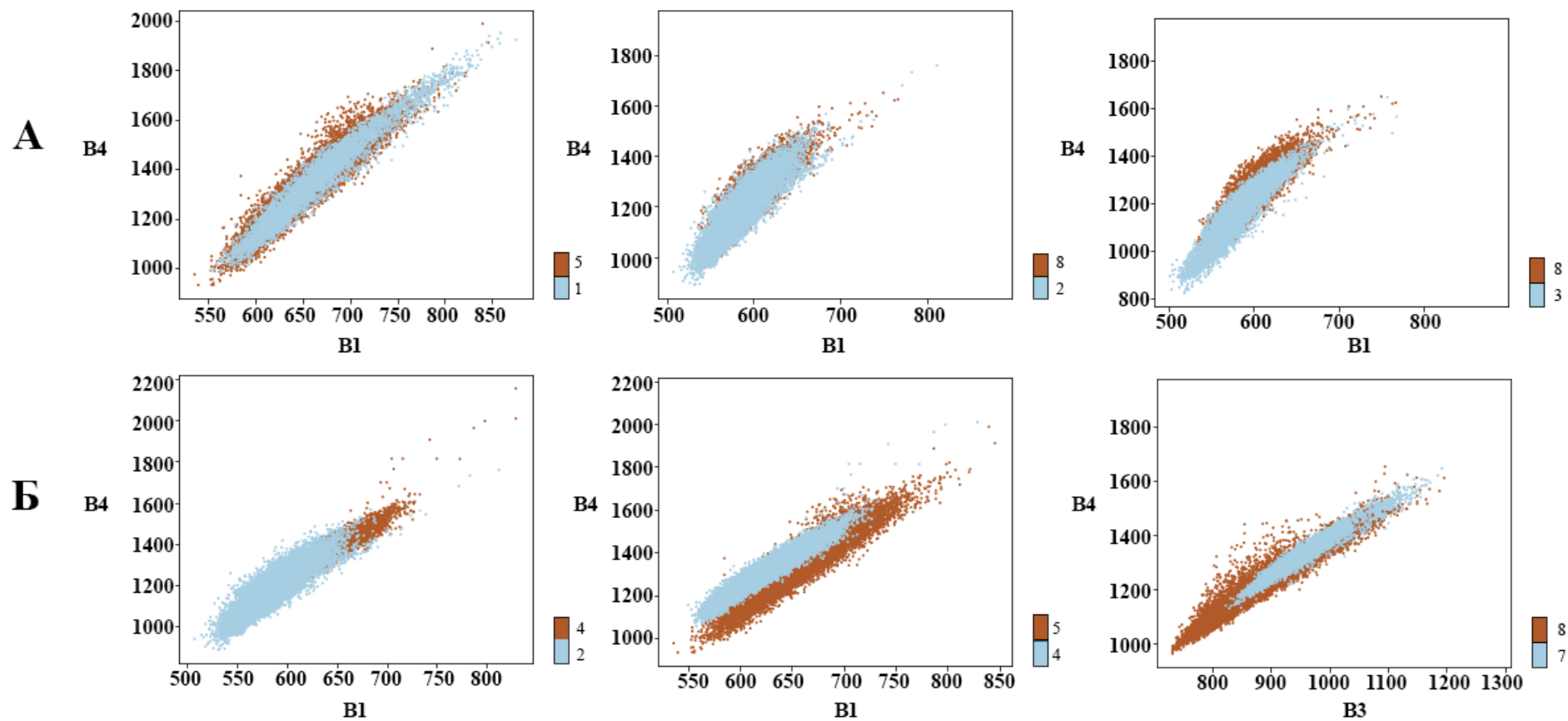


**Рис. 9.** Матрица ошибок классифицированного изображения ключевого участка по вскипанию почв с поверхности (сильное вскипание/нет) по космическому снимку Pleiades, 28.06.2020.  
**Fig. 9.** Error matrix of the classified image of the key area for surface soil effervescence (strong/absent) based on the Pleiades high-resolution satellite image, 28/06/2020.

**Таблица 4.** Статистические показатели классификации изображения ключевого участка по вскипанию почв с поверхности (сильное вскипание/нет) с использованием алгоритма Random Forest по снимку Pleiades, 28.06.2020. **Table 4.** Statistical indices of the image classification of the key area for surface soil effervescence (strong/absent) based on the Random Forest algorithm and the Pleiades satellite image, 28/06/2020.

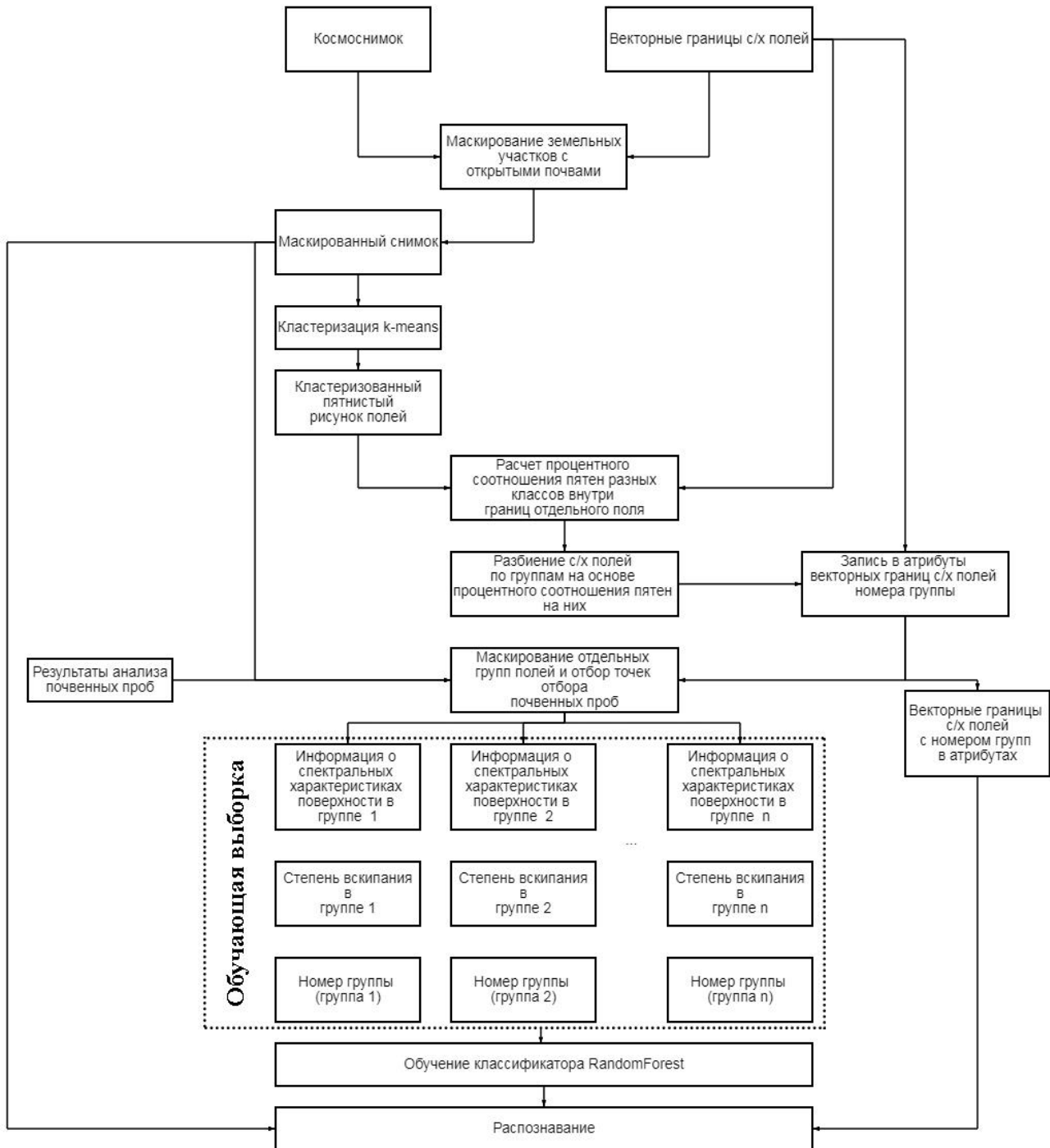
Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – сильное вскипание	0.67	0.73	0.7	71
0 – нет	0.73	0.66	0.69	77
Доля правильных ответов	–	–	0.7	148
Макроусреднение	0.7	0.7	0.7	148
Среднее арифметическое взвешенное	0.7	0.7	0.7	148





**Рис. 10.** Разделение полей по спектральной яркости. *Условные обозначения:* А – яркости полей совпадают, Б – яркости полей разделяются, 1-8 – номера полей. **Fig. 10.** Fields grouped according to their spectral brightness. *Legend:* А – similar brightness, Б – different brightness, 1-8 – No. of fields.

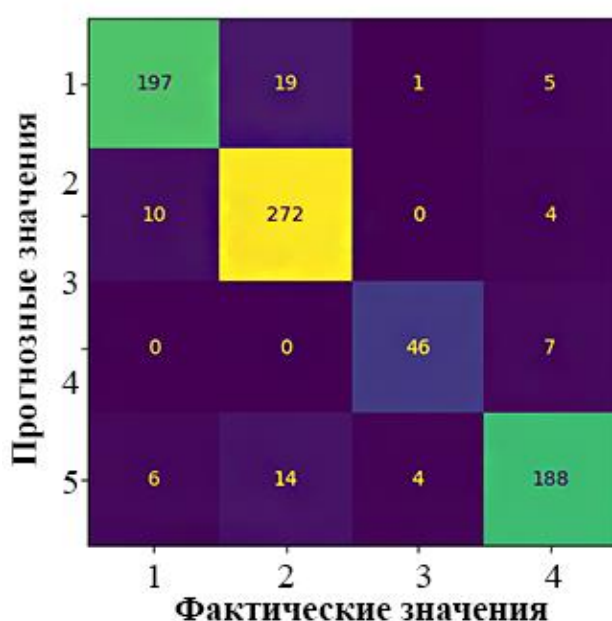
Была создана программа автоматизированного дешифрирования снимков для классификации почв с открытой поверхностью по степени вскипания. Схема этой программы представлена на рисунке 11. Согласно этой схеме, обработка космического изображения производится описанным далее образом.



**Рис. 11.** Схема этапов автоматизированного дешифрирования космического изображения для классификации почв с открытой поверхностью по степени вскипания. **Fig. 11.** Stages of auto-interpretation of a space image to classify the soils with an open surface according to their effervescence degree.

Входное изображение снимка маскируется так, чтобы на нем оставались только поля с открытой поверхностью почвы и векторными границами полей. Далее все выделенные поля группируются с использованием автоматической кластеризации на основе алгоритма k-means, а затем группы полей (или одно поле) обрабатываются по отдельности в программе RandomForest с учетом полевых данных.

*Результаты обработки космических изображений групп полей и отдельных полей.* Рассмотрим результаты классификации группы полей 1 и 5 по степени вскипания с поверхности почв на 4 класса, где 1 – нет вскипания, 2 – слабое вскипание, 3 – среднее вскипание, а 4 – сильное вскипание, с применением алгоритма RandomForest. Для этого будем использовать спектральную яркость не только в точках опробования, но и дополнительно в точках вокруг, с помощью скользящего окна. Получим следующую матрицу ошибок и статистические показатели (метрики; рис. 12, табл. 5).



**Рис. 12.** Матрица ошибок классифицированного изображения по степени вскипания почв с поверхности (4 класса) группы полей № 1 и 5 по космическому снимку высокого разрешения Pleiades, 25.04.2020. **Fig. 12.** Error matrix of the classified image of the fields No. 1 and 5 for their surface soil effervescence (4 classes) based on the Pleiades high-resolution satellite image, 25/04/2020.

**Таблица 5.** Статистические показатели классификации изображения по вскипанию почв с поверхности (4 класса) группы полей № 1 и 5 с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020. **Table 5.** Statistical indices of the image classification of the fields No. 1 and 5 for their surface soil effervescence (4 classes) based on the Random Forest algorithm and the Pleiades satellite image, 25/04/2020.

Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – нет вскипания	0.92	0.89	0.91	222
2 – слабое вскипание	0.89	0.95	0.92	286
3 – среднее вскипание	0.90	0.87	0.88	53
4 – сильное вскипание	0.92	0.89	0.90	212
Доля правильных ответов	–	–	0.91	773
Макроусреднение	0.91	0.90	0.90	773
Среднее арифметическое взвешенное	0.91	0.91	0.91	773

В итоге кросс проверки, где выборка разбивалась на 4 части, точность классификации получилась следующая: 0.881, 0.911, 0.886, 0.928. Общий коэффициент классификации 0.91 (табл. 5).

Визуализация классификации почв по степени вскипания с поверхности группы полей № 1 и 5 на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 представлена на рисунке 13.

При совместном анализе группы полей № 2, 3, 8 точность классификации составила 0.54, что явно недостаточно, поэтому данная группа рассматривается отдельно по каждому полю.

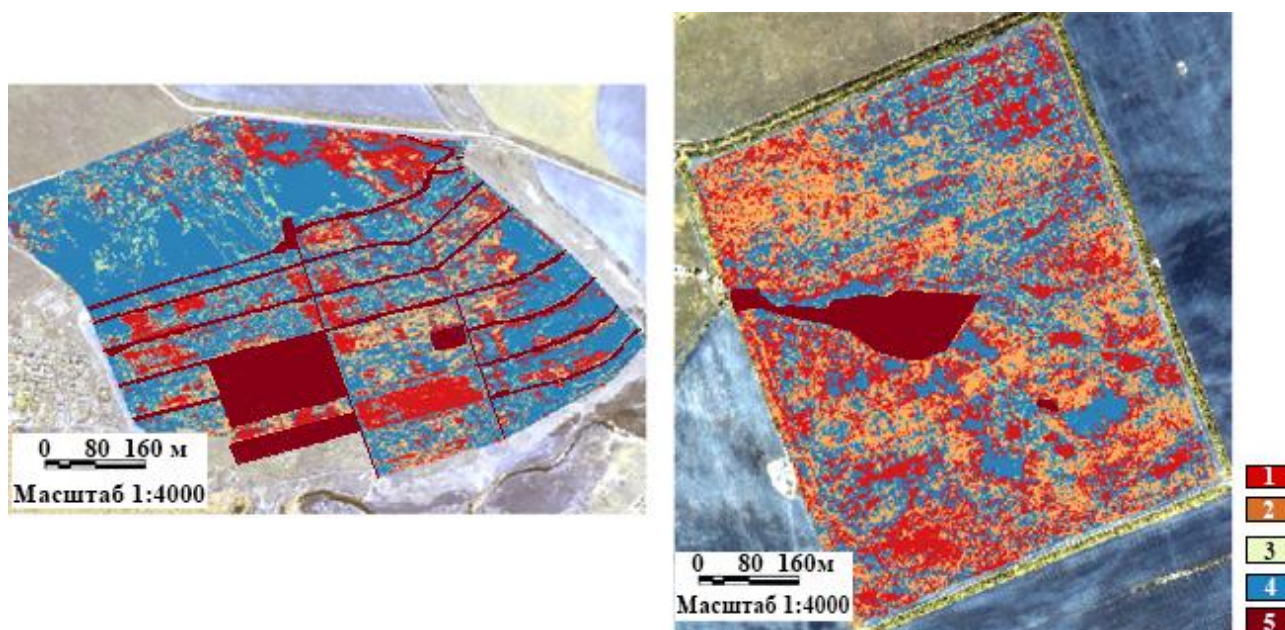
Результаты статистической обработки отдельно для поля № 2 с применением алгоритма RandomForest, используя спектральную яркость в точках опробования и дополнительно вокруг, представлены в матрице ошибок и показателях (метриках) на рисунке 14 и в таблице 6.

В итоге кросс проверки, где выборка разбивалась на 4 части, точность классификации получилась следующая: 0.731, 0.719, 0.761, 0.753. Общий коэффициент классификации 0.75.

Визуализация классификации почв по степени вскипания с поверхности поля № 2 на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 представлена на рисунке 15.

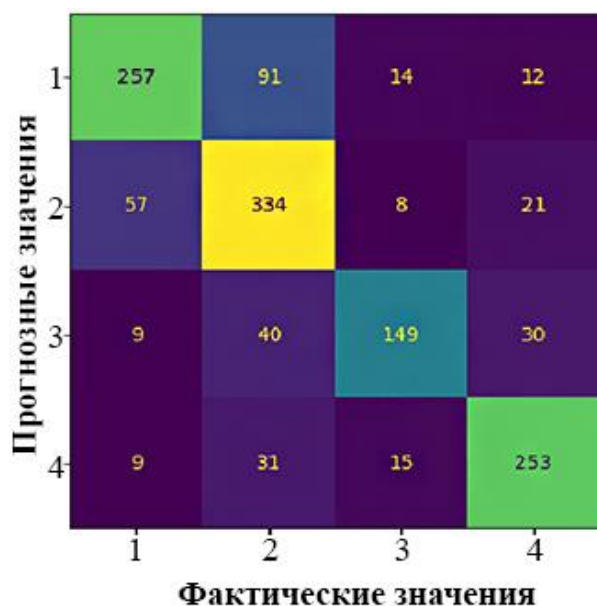
Продолжим обработку отдельного поля № 8 по степени вскипания почв с поверхности и представим матрицу ошибок классификации и статистические показатели (метрики) на рисунке 16 и в таблице 7.

В итоге кросс проверки, где выборка разбивалась на 4 части, точность классификации поля № 8 получилась следующая: 0.767, 0.769, 0.756, 0.774. Общий коэффициент классификации – 0.77.



**Рис. 13.** Результаты классификации полей № 1 и 5 по степени вскипания почв с поверхности на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 с использованием алгоритма Random Forest. Условные обозначения: 1 – нет вскипания, 2 – слабое вскипание, 3 – среднее вскипание, 4 – сильное вскипание, 5 – каналы, дороги, ложбины, участки поля с с/х культурой.

**Fig. 13.** Classification results for the fields No. 1 and 5, according to the degree of their surface effervescence, using the Random Forest and the Pleiades satellite image, 25/04/2020. Legend: 1 – no effervescence, 2 – weak effervescence, 3 – average effervescence, 4 – strong effervescence, 5 – canals, roads, hollows, parts of the fields with agricultural crops.



**Рис. 14.** Матрица ошибок классифицированного изображения по степени вскипания почв с поверхности (4 класса) поля № 2 по космическому снимку высокого разрешения Pleiades, 25.04.2020. **Fig. 14.** Error matrix of the classified image of the field No. 2 for its surface soil effervescence (4 classes) based on the Pleiades high-resolution satellite image, 25/04/2020.

**Таблица 6.** Статистические показатели классификации изображения по вскипанию почв с поверхности (4 класса) поля № 2 с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020. **Table 6.** Statistical indices of the image classification of the field No. 2 for its surface soil effervescence (4 classes) based on the Random Forest algorithm and the Pleiades satellite image, 25/04/2020.

Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – нет вскипания	0.77	0.69	0.73	374
2 – слабое вскипание	0.67	0.80	0.73	420
3 – среднее вскипание	0.80	0.65	0.72	228
4 – сильное вскипание	0.80	0.82	0.81	308
Доля правильных ответов	–	–	0.75	1330
Макроусреднение	0.76	0.74	0.75	1330
Среднее арифметическое взвешенное	0.75	0.75	0.75	1330

Визуальные результаты классификации почв по степени вскипания с поверхности поля № 8 на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 представлены на рисунке 17.

На поле № 3 было заложено больше всего полевых маршрутов по определению вскипания почв с поверхности (рис. 2). Однако отметим, что на данном поле значительную часть площади (до 1/3) занимают луговато- и лугово-каштановые почвы. Проведем обработку без исключения из выборки данных почв, для того чтобы определить их влияние на точность классификации.

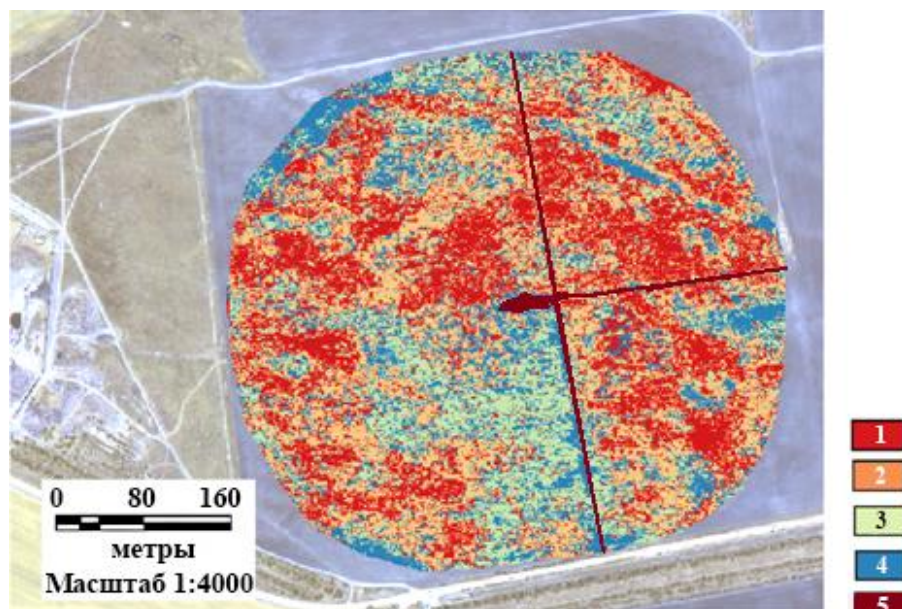
Представим матрицу ошибок классификации и статистические показатели (метрики) обработки поля № 3 на рисунке 18 и в таблице 8.

В итоге кросс проверки, где выборка разбивалась на 4 части, точность классификации поля № 3 получилась следующая: 0.625, 0.613, 0.608, 0.625. Общий коэффициент классификации – 0.65.

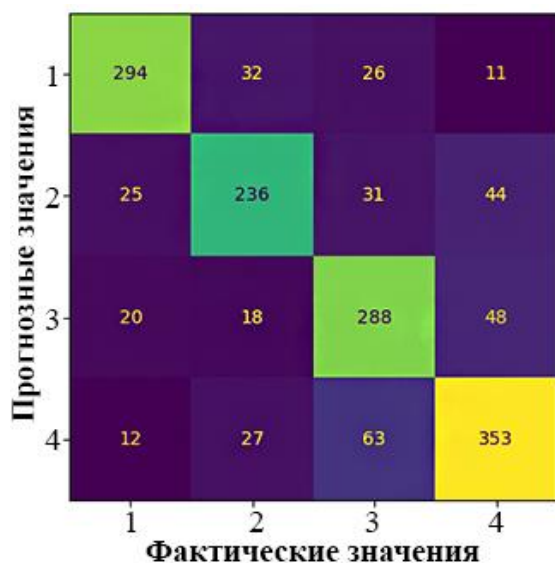
Точность классификации поля № 3 получилась самой низкой (0.65) из всех обработанных изображений, несмотря на то, что полевых точек здесь значительно больше, чем на других



полям. Это подтверждаем наш вывод о том, что луговато- и лугово-каштановые почвы, как правило, не карбонатные по природе, из-за привнесенных карбонатов с близлежащих участков во время распашки или с переносом водой становятся вскипающими и попадают в класс карбонатных почв. Поэтому, при обработке космической информации следует исключать из выборок луговатые и луговые почвы, которые влияют на точность классификации.



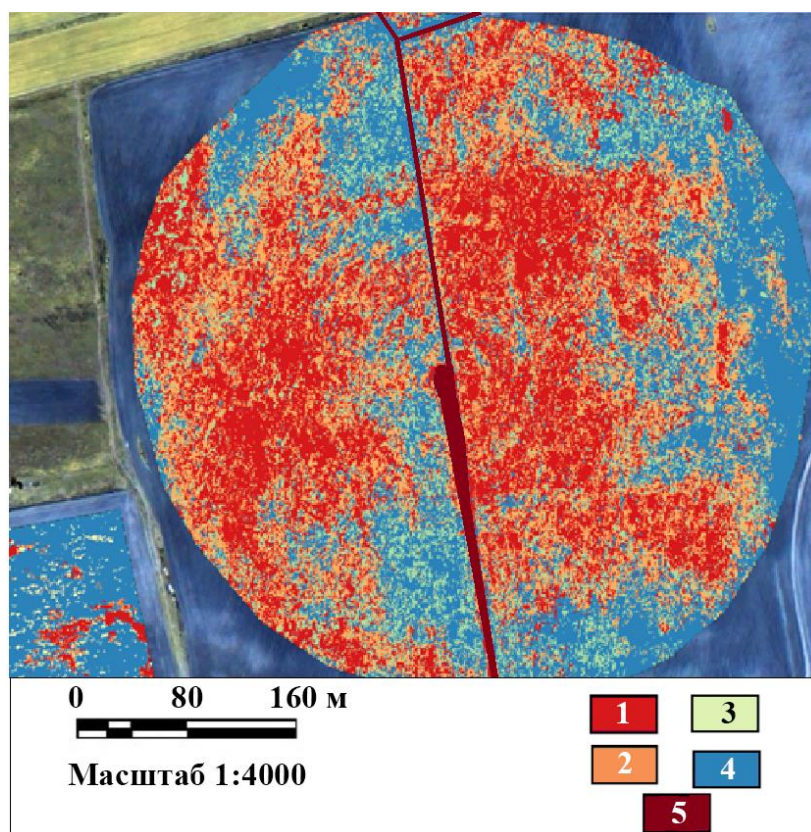
**Рис. 15.** Результаты классификации по степени вскипания почв с поверхности на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 с использованием алгоритма Random Forest для поля № 2. Условные обозначения: 1 – нет вскипания, 2 – слабое вскипание, 3 – среднее вскипание, 4 – сильное вскипание, 5 – каналы, дороги, ложбины и др. **Fig. 15.** Classification results for the field No. 2, according to the degree of its surface effervescence, using the Random Forest and the Pleiades satellite image, 25/04/2020. *Legend:* 1 – no effervescence, 2 – weak effervescence, 3 – average effervescence, 4 – strong effervescence, 5 – canals, roads, hollows.



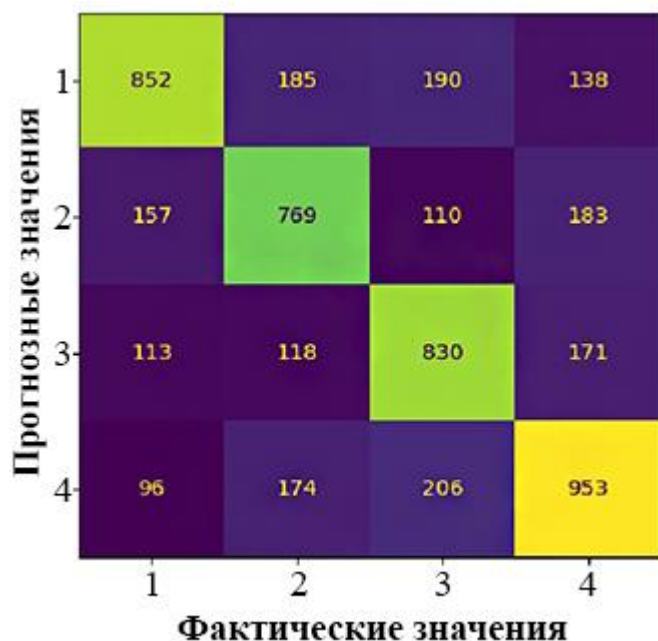
**Рис. 16.** Матрица ошибок классифицированного изображения по степени вскипания почв с поверхности (4 класса) поля № 8 по космическому снимку высокого разрешения Pleiades, 25.04.2020. **Fig. 16.** Error matrix of the classified image of the field No. 8 for its surface soil effervescence (4 classes) based on the Pleiades high-resolution satellite image, 25/04/2020.

**Таблица 7.** Статистические показатели классификации изображения по вскипанию почв с поверхности (4 класса) поля № 8 с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020. **Table 7.** Statistical indices of the image classification of the field No. 8 for its surface soil effervescence (4 classes) based on the Random Forest algorithm and the Pleiades satellite image, 25/04/2020.

Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – нет вскипания	0.84	0.81	0.82	363
2 – слабое вскипание	0.75	0.70	0.73	336
3 – среднее вскипание	0.71	0.77	0.74	374
4 – сильное вскипание	0.77	0.78	0.77	455
Доля правильных ответов	–	–	0.77	1528
Макроусреднение	0.77	0.76	0.77	1528
Среднее арифметическое взвешенное	0.77	0.77	0.77	1528



**Рис. 17.** Результаты классификации поля № 8 по степени вскипания почв с поверхности на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 с использованием алгоритма Random Forest. *Условные обозначения:* 1 – нет вскипания, 2 – слабое вскипание, 3 – среднее вскипание, 4 – сильное вскипание, 5 – дороги, полосы от гидрантов. **Fig. 17.** Classification results for the field No. 8, according to the degree of its surface effervescence, using the Random Forest and the Pleiades satellite image, 25/04/2020. *Legend:* 1 – no effervescence, 2 – weak effervescence, 3 – average effervescence, 4 – strong effervescence, 5 – roads, traces left by irrigation structures.



**Рис. 18.** Матрица ошибок классифицированного изображения по степени вскипания почв с поверхности (4 класса) поля № 3 по космическому снимку высокого разрешения Pleiades, 25.04.2020.  
**Fig. 18.** Error matrix of the classified image of the field No. 3 for its surface soil effervescence (4 classes) based on the Pleiades high-resolution satellite image, 25/04/2020.

**Таблица 8.** Статистические показатели классификации изображения по вскипанию почв с поверхности (4 класса) поля № 3 с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades, 25.04.2020. **Table 8.** Statistical indices of the image classification of the field No. 3 for its surface soil effervescence (4 classes) based on the Random Forest algorithm and the Pleiades satellite image, 25/04/2020.

Параметры (метрики)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1 – нет вскипания	0.70	0.62	0.66	1365
2– слабое вскипание	0.62	0.63	0.62	1219
3 – среднее вскипание	0.62	0.67	0.65	1232
4– сильное вскипание	0.66	0.67	0.66	1429
Доля правильных ответов	–	–	0.65	5245
Макроусреднение	0.65	0.65	0.65	5245
Среднее арифметическое взвешенное	0.65	0.65	0.65	5245

Визуальный результат классификации почв по степени вскипания с поверхности поля № 3 на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 представлен на рисунке 19.

### Выводы

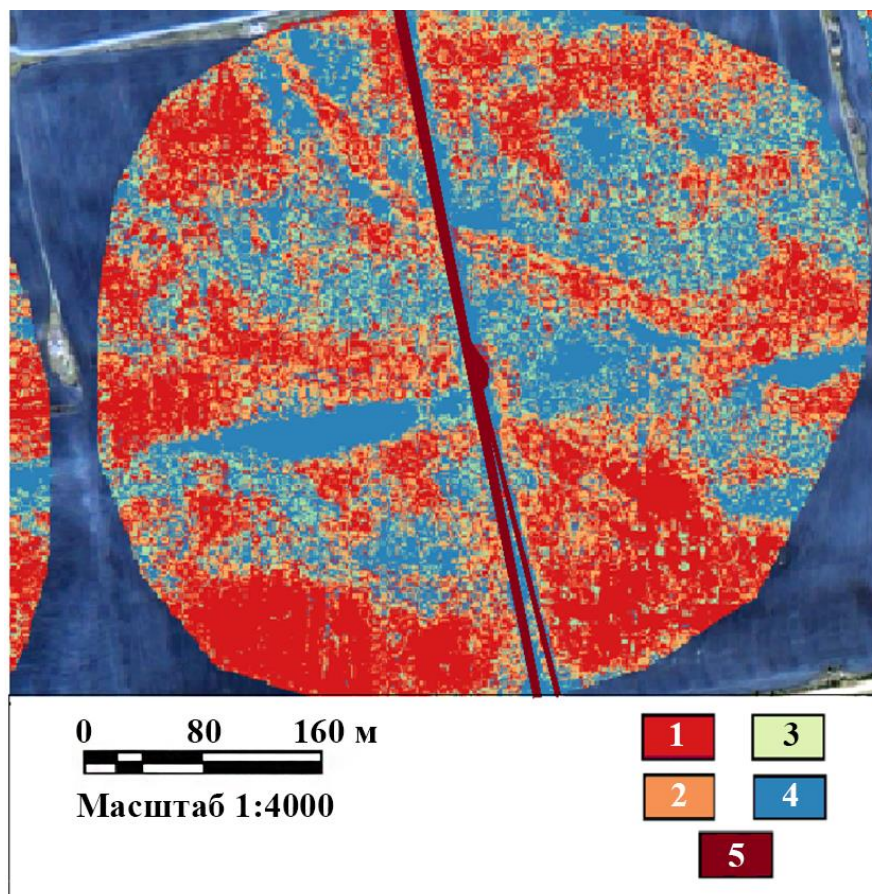
Полученные результаты дают основание считать, что при совместном использовании космической информации высокого разрешения и данных полевых обследований возможно достоверное выделение карбонатных с поверхности почв при соблюдении определенных требований к методике работ:

- проводить полевые обследования и выбирать дату снимков предпочтительно на сухой сезон (май-июль);
- не вовлекать при обработке снимка поля под вегетирующей сельскохозяйственной



культурой, залежью и поверхностью за пределами сельскохозяйственного освоения;

– исключать из выборки луговато- и лугово-каштановые почвы, т.к. гумусированность и влажность почвы маскируют яркость пикселей, а на местности привнесенные карбонаты могут давать искажение в расчетах.



**Рис. 19.** Результаты классификации поля № 8 по степени вскипания почв с поверхности на космическом снимке Pleiades от 25.04.2020 с использованием алгоритма Random Forest. *Условные обозначения:* 1 – нет вскипания, 2 – слабое вскипание, 3 – среднее вскипание, 4 – сильное вскипание, 5 – дороги, полосы от гидрантов. **Fig. 19.** Classification results for the field No.3, according to the degree of its surface effervescence, using the Random Forest and the Pleiades satellite image, 25/04/2020. *Legend:* 1 – no effervescence, 2 – weak effervescence, 3 – average effervescence, 4 – strong effervescence, 5 – roads, traces left by irrigation structures.

Выделение ареалов по степени вскипания почв на открытой поверхности с привлечением дистанционной информации лучше всего проводить в рамках отдельного поля или группы схожих по яркости полей. Разброс полей по яркости на космическом снимке возникает из-за разной влажности почв, а также вида использования земель (богара, орошаемое поле). Яркости пикселей на снимке могут различаться даже у одного типа почв на разных полях. При таком дифференцированном подходе точность классификации почв по степени вскипания (нет, слабое, среднее и сильное) на космическом изображении достигает 0.75-0.90, в то время как при обработке всего участка целиком, возможно выделение карбонатных почв по вскипанию только с градацией сильное вскипание или нет вскипания с точностью 0.7.

*Финансирование.* Работа выполнена по теме государственных заданий № 0439-2022-0009 «Изучить трансформацию, эволюцию и деградацию почвенного покрова агроландшафтов на разных уровнях организации, включая внутриполевую неоднородность с использованием сочетания наземных обследований и цифровых технологий».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Антипов-Каратаев И.Н. 1953. Мелиорация солонцов в СССР. М.: Изд-во АН СССР. 563 с.
2. Водохранилища, пруды и озёра Волгоградской области. 2020 / Ред. А.С. Овчинников. Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. 352 с.
3. Волгоградская область: природные условия, ресурсы, хозяйство, население, геоэкологическое состояние. 2011. Волгоград: Перемена. 528 с.
4. Высоцкий Г.Н. 1915. Ергеня: культурно-фитологический очерк / Труды бюро по прикладной ботанике. Петроград: Типография К. Маттисена в Юрьеве. 331 с.
5. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. 2018. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. № 8. С. 1-18. [Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Prokop'eva K.O., Kharlanov V.A. 2018. Soil Cover of the Svetloyarsk Irrigation System after 50 Years of Reclamation Practices // Eurasian Soil Science. Vol. 51. No. 8. P. 1-11.]
6. Горохова И.Н., Чурсин И.Н., Хитров Н.Б., Панкова Е.И. 2021. Распознавание сельскохозяйственных угодий по космическим снимкам // Экосистемы: экология и динамика. Т. 5. № 3. С. 5-33. [Gorokhova I.N., Chursin I.N., Khitrov N.B., Pankova Ye.I. 2021. Agricultural Lands Identification on the Satellite Imagery // Ecosystems: Ecology and Dynamics. Vol. 5. No. 3. P. 34-59.]
7. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. 1970. Почвы Волгоградской области.
1. Antipov-Karataev IN. Amelioration of solonchets in the USSR [*Melioratsiya solontsov v SSSR*]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1953:563.
2. Reservoirs, ponds and lakes of the Volgograd region [*Vodokhranilishcha, prudy i ozyora Volgogradskoj oblasti*] / ed. A.S. Ovchinnikov. Volgograd: FGBOU VO Volgogradsky GAU, 2020:352.
3. Volgograd region: natural conditions, resources, economy, population, geocological condition [*Volgogradskaya oblast': prirodnye usloviya, resursy, hozyajstvo, naselenie, geoekologicheskoe sostoyanie*]. Volgograd: Peremena, 2011:528.
4. Vysotsky GN. Ergenia: a cultural and phytological essay [*Ergenya: kul'turno-fitologicheskij ocherk*] Proc. of the Bureau of Applied Botany [*Trudy byuro po prikladnoj botanike*]. Petrograd: Tipografiya K. Mattisena v Yur'yevе, 1915:331.
5. Gorokhova IN, Khitrov NB, Prokopyeva KO, Harlanov VA. Soil Cover of the Svetloyarsk irrigation system after 50 years of reclamation practices. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(8):1-11.
6. Gorokhova IN, Chursin IN, Khitrov NB, Pankova YeI. Agricultural lands identification on the satellite imagery. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2021;5(3):34-59.
7. Degtyareva ET, Zhulidova AN. Soils of the Volgograd region [*Pochvy Volgogradskoy oblasti*]. Volgograd: Nizhne-Volzhskeye knizhnoye izd-vo, 1970:319.
8. Dima NA, Keller BA. In the semi-desert region: Soil and botanical studies in the



- Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во. 319 с.
8. Димо Н.А., Келлер Б.А. 1907. В области полупустыни: Почвенные и ботанические исследования на юге Царицынского уезда Саратовской губернии. Саратов: Изд-во Саратовского губернского земства. С. 3-185.
  9. Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. 2020. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. Вып. 104. М.: РАСХН. С. 68-109.
  10. Иванова Е.И. 1928. Очерк почв южной части Подуральского плато и прилегающих районов Прикаспийской низменности. Л.: Изд-во АН СССР. 320 с.
  11. Иванова Е.Н., Фридланд В.М. 1954. Почвенные комплексы сухих степей и их эволюция // Вопросы улучшения кормовой базы в степной, полупустынной и пустынной зонах СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР. С. 162-190.
  12. Классификация и диагностика почв России. 2004. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
  13. Роде А.А. 1947. Почвообразовательный процесс и эволюция почв. М.: Географгиз. 142 с.
  14. Руководство по описанию почв. 2012. Рим. Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций. 101 с.
  15. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. 1954 / Ed. L.A. Richards USDA. Agriculture Handbook. No. 60. 160 p.
  16. Guidelines for Soil Description. 2006. 4<sup>th</sup> ed. Rome: FAO. 98 p.
  17. Tian F., Hou M., Qiu Y., Zhang T., Yuan Y. 2020. Salinity Stress Effects on Transpiration and Plant Growth under Different Salinity Soil Levels Based on south of Tsaritsynskyuyezd of Saratov province [V oblasti polupustyni: Pochvennye i botanicheskie issledovaniya na yuge Caricinskogo uезда Saratovskoj gubernii]. Saratov: Izd-vo Saratovskogo gubernskogo zemstva, 1907;3-185.
  9. Zinchenko EV, Gorokhova IN, Kruglyakova NG, Khitrov NB. The current state of irrigated soils in the south of the Volga Upland [Sovremennoye sostoyaniye oroshayemykh pochv yuga Privolzhskoy vozvyshehnosti] *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*. 2020;104:68-109.
  10. Ivanova EI. Review of the soils of the southern part of the Pre-Ural Plateau and adjacent areas of the Caspian Lowland [*Oчерк почв yuzhnoy chasti Podural'skogo plato i prilegayushchikh rajonov Prikaspiyskoy nizmennosti*]. Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1928:320.
  11. Ivanova EN, Friedland VM. Soil complexes of dry steppes and their evolution [*Pochvennye komplekсы suhih stepей i ih evolyuciya*] Issues of improving the food supply in the steppe, semi-desert and desert zones of the USSR [*Voprosy uluchsheniya kormovoj bazy v stepnoj, polupustynnoj i pustynnoj zonah SSSR*]. Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1954:162-190.
  12. Classification and diagnostics of soils in Russia [*Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii*]. Smolensk: Oikumena, 2004:342 p.
  13. Rode AA. Soil formation and evolution [*Pochvoobrazovatel'nyy protsess i evolyutsiya pochv*]. Moscow: Geografgiz, 1947:142.
  14. Guide to the description of soils [*Rukovodstvo po opisaniyu pochv*]. Rome: FAO, 2012:101.
  15. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils / ed. L.A. Richards. USDA. Agriculture Handbook. 1954;60:160.
  16. Guidelines for Soil Description. 4<sup>th</sup> ed.

- Thermal Infrared Remote (TIR) Technique // *Geoderma*. Vol. 357. P. 113961.
18. Wang F., Shi Z., Biswas A., Yang S., Ding J. 2020. Multi-algorithm Comparison for Predicting Soil Salinity // *Geoderma*. Vol. 365. P. 114211.
  19. Wang J., Ding J., Yu D., Ma X., Zhang Z., Ge X., Teng D., Li X., Liang J., Lizaga I., Chen X., Yuan L., Guo Y. 2019. Capability of Sentinel-2 MSI Data for Monitoring and Mapping of Soil Salinity in Dry and Wet Seasons in the Ebinur Lake Region, Xinjiang, China // *Geoderma*. Vol. 353. P. 172-187.
  20. Zarea E., Arshad M., Zhao D., Nachimuthu G., Triantafilis J. 2020. Two-dimensional time-lapse imaging of soil wetting and drying cycle using EM38 data across a flood irrigation cotton field // *Agricultural Water Management*. No. 241. P. 106383. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106383>
  17. Tian F, Hou M, Qiu Y, Zhang T, Yuan Y. Salinity Stress Effects on Transpiration and Plant Growth under Different Salinity Soil Levels Based on Thermal Infrared Remote (TIR) Technique. *Geoderma*. 2020;357:113961.
  18. Wang F, Shi Z, Biswas A, Yang S, Ding J. Multi-Algorithm Comparison for Predicting Soil Salinity. *Geoderma*. 2020;365: 114211.
  19. Wang J, Ding J, Yu D, Ma X, Zhang Z, Ge X, Teng D, Li X, Liang J, Lizaga I, Chen X, Yuan L, Guo Y. Capability of Sentinel-2 MSI Data for Monitoring and Mapping of Soil Salinity in Dry and Wet Seasons in the Ebinur Lake Region, Xinjiang, China. *Geoderma*. 2019;353:172-187.
  20. Zarea E, Arshad M, Zhao D, Nachimuthu G, Triantafilis J. Two-dimensional time-lapse imaging of soil wetting and drying cycle using EM38 data across a flood irrigation cotton field. *Agricultural Water Management*. 2020;241:106383. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106383>

UDC631.4

#### SATELLITE DATA TO HELP DISTINGUISH CALCAREOUS SOILS IN THE VOLGA-DON IRRIGATION SYSTEM, VOLGOGRAD REGION

© 2023. I.N. Gorokhova\*, I.N. Chursin\*\*, N.B. Khitrov\*, N.K. Kruglyakova\* \*\*\*

\*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute

Russia, 119017, Moscow, Pyzhevskiy Per., 7. E-mail: g-irina14@yandex.ru

\*\*Scientific Geoinformation Center of the Russian Academy of Science

Russia, 119019, Moscow, p/o 168, Novyy Arbat Str., 11. E-mail: chursin.ivan93@gmail.com

\*\*\*All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture

Russia, 400002, Volgograd, Timiryazeva Str., 9. E-mail: kruglyakova02032013@yandex.ru

Received December 16, 2022. Revised February 01, 2023. Accepted February 02, 2023.

In this study we substantiate the importance of identification of the areas with calcareous soils on the key plot of the “Oroshayemaya” experimental station that belongs to the Volga-Don irrigation system, Volgograd Region, using high-resolution satellite data (Pleiades). Carbonates in soils have both a positive and a negative impact; therefore, it is important to identify such soils. We identified calcareous areas on the satellite images, judging by the spots of various degrees of soil effervescence on the surface, caused by HCl solution, which, in its turn, was detected via the contact method in the cultivated fields. After that we determined a relationship between the spectral brightness of soil

effervescence in different channels of the satellite image and its degree. In order to do this, we took a sample of pixels from the images that corresponded to the patches of surface effervescence in the terrain that was previously used in the Random Forest algorithm to select classes in the image. The results showed that identification of the areas with surface layer of calcareous soils (soil effervescence), using satellite data, will be the most optimal if the field research and the survey data took place during the dry season of the year, i.e. from May to July.

For image processing the images of open fields should be used, while the undeveloped ones should be ignored. It is also necessary to exclude patches of meadow and meadow-chestnut soils from the sample, since they are usually located in depressions and can interfere with calculations due to the carbonates that flow in from the side. It is best to allocate the areas of calcareous soils within a single field or within a group of fields with similar brightness level; different brightness levels indicate different types of land use, such as dry farming and irrigated fields. Such a differentiated approach allows the precision of soils classification on the satellite image reach 0.75-0.90, based on the degree of their effervescence (no effervescence, weak, average, strong). However, when the entire key plot is processed, only the soils with “strong effervescence” or “no effervescence” can be identified with the precision of 0.7. The novelty of our work results lies in the substantiation of the possibility to reliably identify (while following all the requirements) calcareous soils on the ground surface by using high-resolution satellite data together with field survey data.

*Keywords:* calcareous soils, soil effervescence, degree of soil effervescence, open surface, satellite imagery, spectral brightness, classification precision, Volgograd Region.

*Funding.* This work was carried out for the state assignments No. 0439-2022-0009 “To Study the Transformation, Evolution and Degradation of the Soil Cover in the Agricultural Landscapes at Different Levels of Organization, Including the Heterogeneity of Their Fields and Using Ground Surveys along with Digital Technologies”.

**DOI: 10.24412/2542-2006-2023-1-66-91**

**EDN: CPYWFH**