

РАННЕЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ DOVE (PlanetScope)

© 2021 г. А.П. Шевырнов*, Д.В. Емельянов*, Н.О. Мальчиков*, Т.Н. Демьяненко**,
В.К. Ивченко**, И.Ю. Ботвич*

**Институт биофизики СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50*

E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

***Красноярский государственный аграрный университет, 660049, Красноярск, просп. Мира, 90*

E-mail: v.f.ivchenko@mail.ru

Поступила в редакцию 29.09.2020 г.

После доработки 29.09.2020 г.

Принята к публикации 07.07.2021 г.

Представлены результаты раннего прогнозирования урожайности яровой пшеницы на основе данных Dove (PlanetScope) компании Planet Labs с пространственным разрешением 3 м. Выполнено прогнозирование урожайности яровой пшеницы в начале июля в фазу колошения — начало цветения на основании линейной регрессионной модели, в качестве параметров использованы значения интеграла под кривой NDVI в разные периоды времени. Установлен вид множественной линейной модели для прогноза урожайности яровой пшеницы при восьми переменных (коэффициент детерминации — 0.86; среднеквадратичная ошибка прогноза — 3.77). Построена карта урожайности яровой пшеницы по спутниковым данным PlanetScope с пространственным разрешением 3 м. Полученная карта позволила выявить неоднородность уровня урожайности в пределах опытного поля. Проведенные исследования показали хорошую связь между интегралом NDVI и фактической урожайностью, полученной в конце вегетационного периода. Следовательно, промежуточные результаты внутрисезонных измерений могут быть использованы для коррекции дозы внесения удобрений.

Ключевые слова: точное земледелие, урожайность, вегетационный период, яровая пшеница, PlanetScope.

DOI: 10.31857/S0006302921060119

Технология дистанционного зондирования Земли широко используется во многих областях экономики из-за быстрого отображения широкого спектра различных показателей. Сельское хозяйство является одной из перспективных областей внедрения технологий дистанционного зондирования. С его помощью можно своевременно получать информацию об условиях роста и развития сельскохозяйственных культур, вносить необходимые коррективы при использовании удобрений, что дает возможность получать запланированные результаты. Это позволяет обеспечить устойчивость и стабильность сельскохозяйственного производства.

Важно использование методов дистанционного зондирования Земли для оптимизации производства продукции растениеводства. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур представляет прямой интерес для:

— отдельных фермеров для оптимизации качества и количества продукции;

— национальных сельскохозяйственных министерств;

— для обеспечения продовольственной безопасности, особенно в развивающихся странах;

— частных компаний, таких как страховщики урожая или трейдеры [1–3].

Спутниковые данные с различным пространственным, временным и спектральным разрешением используются для прогнозирования урожайности в широком диапазоне географических условий и масштабов (от небольших фермерских хозяйств до глобального уровня) [4–7]. Однако применение спутниковых данных для прогнозирования урожайности затрудняется низким пространственным разрешением и, как правило, неоптимальной временной выборкой [8, 9].

Для осуществления прогноза урожайности в Российской Федерации в основном используются не всегда эффективные традиционные приемы оценки агроклиматических ресурсов райониро-

вания территорий с помощью комплексных агро-климатических показателей. Для выхода из этой ситуации В.М. Брыксиным и др. была предложена модифицированная модель биопродуктивности EPIC [10]. Однако данная система очень сложна в применении, так как в вычислениях используется большое количество входных параметров. Стоит отметить, что уже сегодня возможно использование систем для мониторинга посевных площадей агропромышленного комплекса, которые позволяют обеспечить объективную оценку состояния посевов как на уровне регионов, так и на уровне отдельных хозяйств [11, 12]. В настоящее время для мониторинга сельскохозяйственных полей в Институте космических исследований РАН разработан специализированный спутниковый сервис «ВЕГА», который обеспечивает возможность работы с архивами данных, накопленных за период с 2000 г. по настоящее время [13]. Но все эти системы большей своей частью служат в качестве инструментов для научных исследований и в меньшей степени — для актуального, своевременного прикладного использования.

Идея объединения спутниковых и наземных данных в моделях для улучшения регионального и глобального прогнозирования урожайности существует давно [14–17], однако на практике этот подход по-прежнему в основном используется в научных исследованиях, а не в сельскохозяйственном производстве. При этом основное количество исследований сосредоточено на более простых однородных ландшафтах [18, 19].

Использование спектральной информации высокого пространственного и временного разрешения (в том числе данных Dove (PlanetScope) компании PlanetLabs с пространственным разрешением 3 м) дает возможность осуществлять мониторинг, в том числе прогнозирование урожайности, для решения задач «точного земледелия». Основой научной концепции точного земледелия являются представления о существовании неоднородностей различных параметров в пределах одного поля. Преимущество предлагаемой технологии состоит в том, что она позволяет производить анализ внутрипольной вариативности различных характеристик: почвенных, температурных, влажностных и др., а следовательно, и урожайности посевов сельскохозяйственных культур.

Работы по раннему прогнозированию урожайности посредством применения методов дистанционного зондирования Земли единичны. Причиной этого является тот факт, что не до конца разработаны общие подходы и методология оцен-

ки продуктивности растений по данным дистанционного зондирования. Поэтому необходимы исследования, раскрывающие специфику взаимосвязи урожайности сельскохозяйственных культур с данными дистанционного зондирования Земли различного уровня.

Цель данного исследования — разработка метода точного земледелия для раннего прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования (спутниковых) и геоботанических исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на землях ООО «Учебно-опытное хозяйство «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края в течение вегетационного периода 2019 г. На рис. 1 представлено месторасположение опытного поля и его структура. Опытное поле состоит из пяти полос со средней протяженностью 650 м. Направленность полос с запада на восток, ширина каждой полосы 20 м. Внесение удобрений проводили по северной части каждой полосы (шириной 10 м), южная оставалась без удобрений. Каждая полоса была засеяна определенным видом сельскохозяйственных культур. В работе представлен анализ результатов обработки данных по полосе № 2, засеянной пшеницей «Новосибирская-15» (рис. 2). Посев пшеницы проведен 29 мая. В предыдущем 2018 г. на данной полосе проводили посев кукурузы. В полевом опыте применяли минеральное азотное удобрение — аммиачную селитру. Доза внесения составляла 34.7 кг/га д.в. Удобрения вносили одновременно с посевом яровой пшеницы сеялкой «Агратор-4.8». Все полосы разделены на четыре тестовых участка в соответствии с четырьмя способами обработки почв:

способ 1 — прямой посев при нулевой обработке почвы (сеялка «Агратор 4.8»);

способ 2 — поверхностная обработка (дискатор БДШ-5.6 на 8–10 см);

способ 3 — плоскорезная обработка (культиватор КПШК-3.8 на 20–22 см);

способ 4 — вспашка (плуг ПН-5-35 на 20–22 см);

Для чистоты эксперимента все тестовые участки отделены друг от друга защитными полосами шириной 5 м.

Учет урожайности зерна пшеницы проводили сплошным методом с помощью комбайна в шестикратной повторности для каждого способа обработки почв. Урожайность зерна рассчитывали в

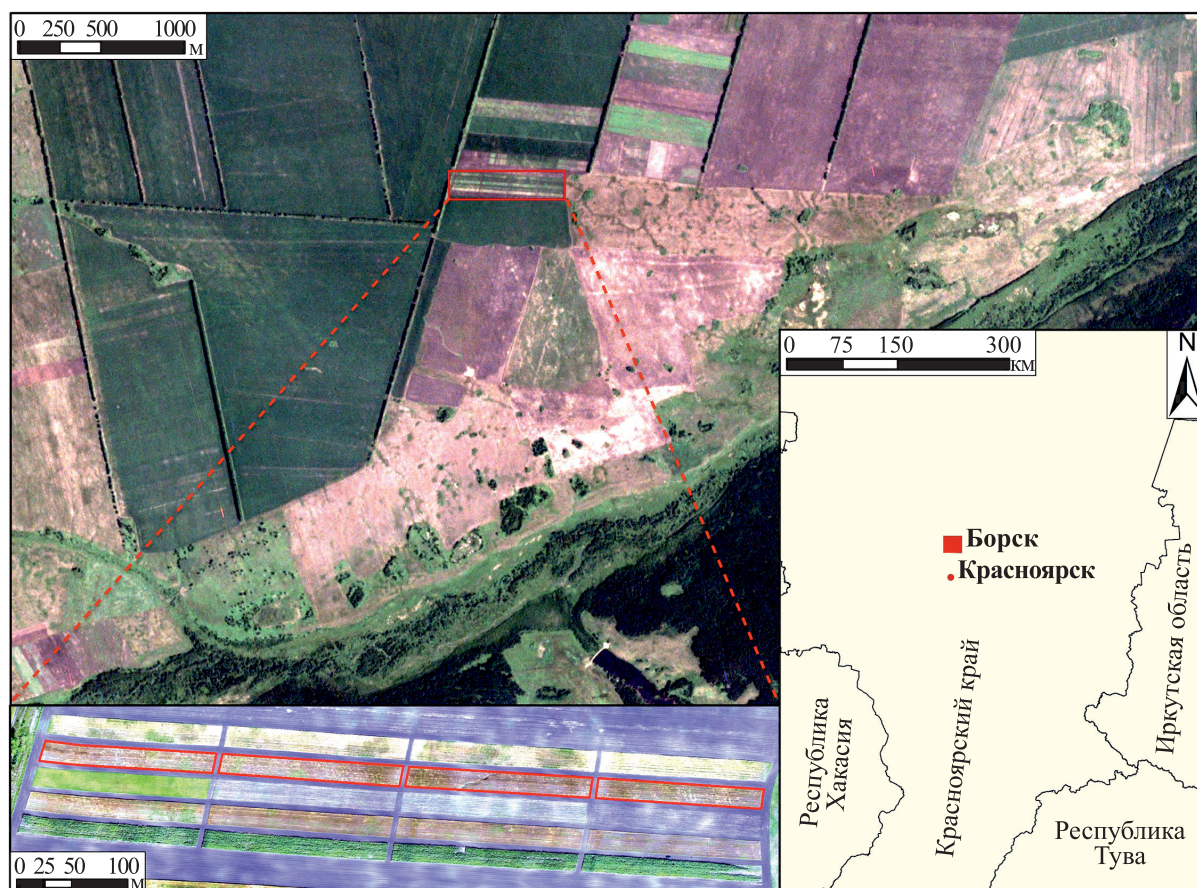


Рис. 1. Месторасположение опытного поля учебного хозяйства «Миндерлинское» и его структура по видам обработки и культурам. Полоса № 2 засеяна яровой пшеницей. Выделены границы разных видов обработки почвы (способы 1–4) – в направлении слева направо.

центнерах с 1 га с учетом пересчета на 14%-ю влажность и 100%-ю чистоту.

Исследование основывается на спутниковых данных PlanetScore с пространственным разрешением 3 м. На этапе предварительной обработ-

ки проводили атмосферную коррекцию данных PlanetScore. Корректирующие коэффициенты для каждого канала присутствуют в метаданных каждой сцены. Каждая сцена имела небольшие пространственные расхождения по отношению к



Рис. 2. Фотоизображения посева яровой пшеницы в разные фазы вегетации.

другим сценам по осям X или Y , или же одновременно по обеим осям. Поэтому для выравнивания снимков применяли инструмент «Сдвиг» в приложении ArcMap программного пакета ESRI ArcGIS.

В ходе тематической обработки спутниковой информации проводили расчет значений индекса $NDVI$ (Normalized Difference Vegetation Index) [20]. Расчет $NDVI$ базируется на данных красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) диапазонов оптического спектра: $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ранее проведенных исследованиях [21] было установлено, что использование интегральных показателей вегетационных индексов в модельных прогнозах урожайности ячменя позволяет выполнять прогноз с максимальной вероятностью в фазе цветения — молочной спелости. Из четырех исследуемых вегетационных индексов ($MSAVI2$, $NDVI$, $VARI$, CI_{Green}) только индекс $VARI$ показал достаточно низкую корреляционную связь с урожайностью (до 0.48). Коэффициенты корреляции между урожайностью и величиной интеграла индексов $MSAVI2$, $NDVI$ и CI_{Green} достигают значений 0.8–0.9, начиная с фазы цветения.

Расчет криволинейного интеграла исследуемых индексов (I) проводили по следующей формуле:

$$I = \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{V_k + V_{k+1}}{2} \right) \cdot (d_{k+1} - d_k) \right),$$

где V_k — значение вегетационного индекса, d_k — время (день съемки), n — количество измерений.

На рис. 3 представлены картограммы значений интеграла $NDVI$ посевов пшеницы в течение периода вегетации с 29 мая по 7 сентября 2019 г., полученные по данным PlanetScore.

Для прогнозирования урожайности яровой пшеницы в начале июля (фаза колошения — начало цветения) построена линейная регрессионная модель, в которой в качестве параметров использованы значения интеграла под кривой $NDVI$ в разные периоды времени. Для построения регрессионной модели использовали массив значений $NDVI$ и величин урожайности отдельных участков размером 180 м². Величину урожайности на данных участках определяли в ходе уборки урожая с помощью зерноуборочного комбайна «TERRION», значения $NDVI$ брали из данных PlanetScore. Усреднение $NDVI$ проводили по

группе пикселей, попадающих в анализируемый участок. Множественная линейная модель для прогноза урожайности яровой пшеницы имеет следующий вид при восьми переменных (коэффициент детерминации 0.86, среднеквадратичная ошибка прогноза 3.77):

$$Y = 44.14 - 131.73 \cdot I_{NDVI1} + 133.79 \cdot I_{NDVI2} - 32.99 \cdot I_{NDVI3} - 118.47 \cdot I_{NDVI4} + 104.66 \cdot I_{NDVI5} + 12.58 \cdot I_{NDVI6} + 43.19 \cdot I_{NDVI7} - 40.78 \cdot I_{NDVI8},$$

где Y — урожайность, I_{NDVIi} — значения интеграла $NDVI$ в отдельные периоды времени (i).

Проведенные расчеты позволили построить картограмму урожайности исследуемого участка. На рис. 4 в строке I показано фактическое распределение урожайности. Карта урожайности построена для каждого участка с учетом вида обработки и фона (удобренные/не удобренные), посредством интерполяции прямых измерений (четыре точки), полученных в ходе уборки. На рис. 4 в строке II показано пространственное распределение урожайности исследуемого участка, полученное по результатам модельного расчета.

Полученная спутниковая карта позволила выявить неоднородность уровня урожайности в пределах поля. Отчетливо выделены зоны с повышенной урожайностью зерна яровой пшеницы, на которых проведено внесение удобрений (красный цвет соответствует наибольшим значениям урожайности). При обработке «вспашка» урожайность на удобренном фоне была на 36.4% больше, чем на фоне без удобрений, при плоскорезной обработке — на 26.5%, при поверхностной обработке — на 28.8%; в случае прямого посева при нулевой обработке почвы — на 25.9%.

Картирование урожайности является неотъемлемой частью дифференцированного применения удобрений и других агрохимических средств. Использование модельных карт урожайности позволяет определить проблемные участки, для дальнейшего определения причин снижения урожайности и принятия соответствующих мер. Это позволит увеличить валовые сборы продукции и улучшить качество урожая.

ВЫВОДЫ

Проведено изучение пространственного изменения значений индекса $NDVI$ посевов яровой пшеницы с 29 мая по 7 сентября 2019 г. по спутниковым данным PlanetScore. Получены данные пространственного изменения интеграла $NDVI$ яровой пшеницы в течение периода вегетации по данным PlanetScore.

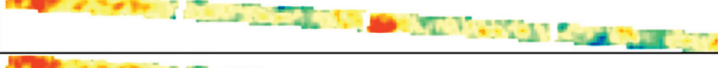
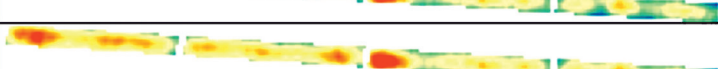
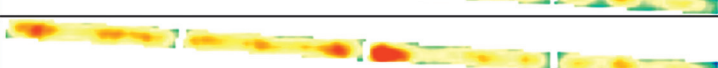
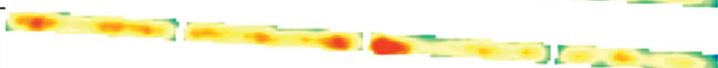
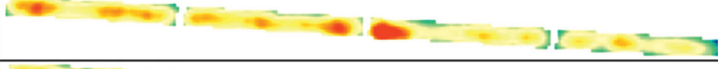
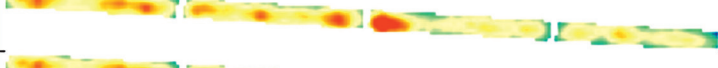
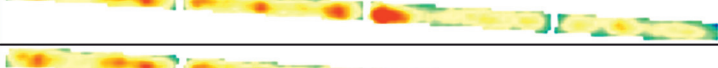
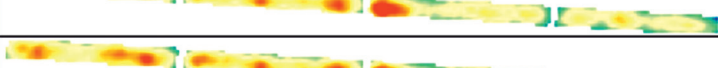
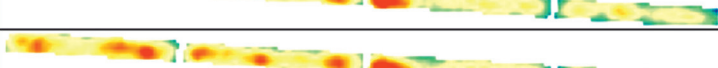
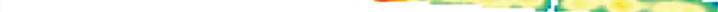
Дата		Способ 1	Способ 2	Способ 3	Способ 4		
Начало	Конец					Мин.	Макс.
29.05.2019	04.06.2019					0.62	0.97
29.05.2019	06.06.2019					0.90	1.35
29.05.2019	08.06.2019					1.26	1.84
29.05.2019	21.06.2019					4.46	5.82
29.05.2019	22.06.2019					4.80	6.26
29.05.2019	29.06.2019					7.69	10.02
29.05.2019	02.07.2019					9.11	11.84
29.05.2019	07.07.2019					11.70	15.15
29.05.2019	12.07.2019					13.72	18.41
29.05.2019	30.07.2019					20.43	29.00
29.05.2019	02.08.2019					21.60	30.56
29.05.2019	03.08.2019					21.95	31.01
29.05.2019	04.08.2019					22.24	31.39
29.05.2019	22.08.2019					26.95	37.00
29.05.2019	26.08.2019					28.01	38.08
29.05.2019	27.08.2019					28.29	38.34
29.05.2019	02.09.2019					29.99	39.93
29.05.2019	07.09.2019					31.30	41.21

Рис. 3. Картограммы значений интеграла $NDVI$ посевов пшеницы в течение периода вегетации (с 29 мая по 7 сентября 2019 г.), полученные по данным PlanetScope. Белыми линиями обозначено разделение на виды обработки (способы 1–4). Раскраска картограмм выполнена с использованием одной цветовой шкалы для всех дат исследований. Минимальные и максимальные значения цветовых шкал представлены в таблице — напротив соответствующей картограммы.

Выполнено раннее прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным дистанционного зондирования с помощью PlanetScope в начале июля в фазу колошения — начало цветения пшеницы на основании линейной регрессионной модели. В качестве параметров использованы значения интеграла под кривой $NDVI$ в разные

периоды времени. Определен вид множественной линейной модели для прогноза урожайности яровой пшеницы при восьми переменных (коэффициент детерминации 0.86, среднеквадратичная ошибка прогноза 3.77).

Построена карта урожайности яровой пшеницы по спутниковым данным PlanetScope с про-

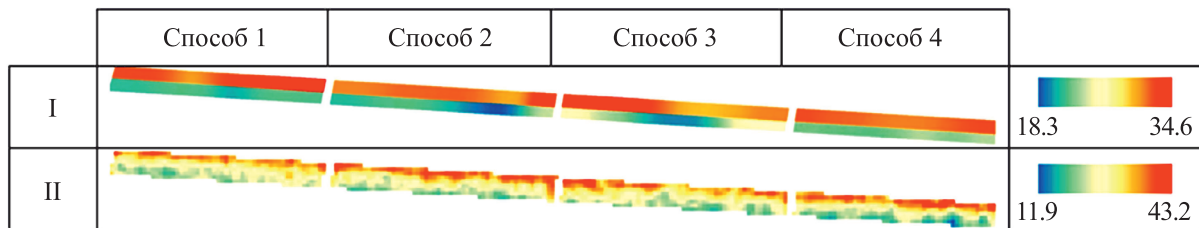


Рис. 4. Карта урожайности поля яровой пшеницы, полученная по наземным данным (I) и результатам модельного расчета (II).

странственным разрешением 3 м. Полученная карта позволила выявить неоднородность уровня урожайности в пределах опытного поля.

Проведенные исследования показали хорошую связь между интегралом *NDVI* и фактической урожайностью, полученной в конце вегетационного периода. Следовательно, промежуточные результаты внутрисезонных измерений могут быть использованы для коррекции дозы внесения удобрений.

Отсюда следует важный вывод, что использование и применение полученных результатов также позволит существенно оптимизировать дозы внесения минеральных удобрений с учетом пестроты почвенного плодородия за счет снижения их на относительно плодородных внутрипольных участках и увеличения на менее плодородных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках реализации проекта: «Разработка и внедрение метода раннего прогнозирования урожайности зерновых культур в Сибирском регионе по данным дистанционного зондирования Земли».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Filippi, E. J. Jones, N. S. Wimalathunge, et al., *Precis. Agric.* **20** (5), 1015 (2019).
2. F. Kogan, in *Remote Sensing for Food Security*, ed. by F. Kogan (Springer, Cham, 2019), pp. 163–173.
3. F. Kogan, W. Guo, and W. Yang, *Geomatics, Nat. Hazards Risk* **10**, 651 (2019).
4. M. Battude, A. Al Bitar, D. Morin, et al., *Remote Sens. Environ.* **184**, 668 (2016).
5. D. M. Johnson, *Remote Sens. Environ.* **141**, 116 (2014).
6. I. Mariotto, P. S. Thenkabail, A. Huete, et al., *Remote Sens. Environ.* **139**, 291 (2013).
7. L. Wall, D. Larocque, and P. M. Leger, *Int. J. Remote Sens.* **29**, 2211 (2008).
8. K. Wang, S. E. Franklin, X. Guo, and M. Cattet, *Sensors* **10**, 9647 (2010).
9. M. Zaman-Allah, O. Vergara, J. Araus, et al., *Plant Methods* **11**, 35 (2015).
10. В. М. Брыксин, А. В. Евтюшкин и Н. В. Рычкова, *Изв. Алтайского гос. ун-та* **1–2** (65), 89 (2010).
11. В. А. Толпин, С. А. Барталев, В. Ю. Ефремов и др., *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* **2** (7), 221 (2010).
12. И. Ю. Савин, Е. А. Лупян и С. А. Барталев, *Геоматика* **2**, 69 (2011).
13. Е. А. Лупян, И. Ю. Савин, С. А. Барталев и др., *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* **1** (8), 190 (2011).
14. R. Delecolle, S. J. Maas, M. Guerif, and F. Baret, *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.* **47**, 145 (1992).
15. S. Moulin, A. Bondeau, and R. Delecolle, *Int. J. Remote Sens.* **19**, 1021 (1998).
16. P. C. Doraiswamy, T. R. Sinclair, S. Hollinger, et al., *Remote Sens. Environ.* **97**, 192 (2005).
17. W. A. Dorigo, R. Zurita-Milla, A. J. W. de Wit, et al., *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **9**, 169 (2007).
18. A. V. M. Ines, N. N. Das, J. W. Hansen, and E. G. Njoku, *Remote Sens. Environ.* **138**, 149 (2013).
19. Y. Xie, P. Wang, X. Bai, et al., *Agric. For. Meteorol.* **246** (2017).
20. C. F. Jordan, *Ecology* **50**, 663 (1969).
21. И. Ю. Ботвич, Д. В. Емельянов, А. А. Ларько и др., *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* **5** (16), 183 (2019).

Early Forecast of Crop Yields Based on PlanetScope Dove Satellite Data

A.P. Shevyrnogov*, D.V. Emelyanov*, N.O. Malchikov*, T.N. Demyanenko,
V.K. Ivchenko**, and I.Yu. Botvich***

**Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Akademgorodok 50/50, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

***Krasnoyarsk State Agrarian University, prosp. Mira 90, Krasnoyarsk, 660049 Russia*

The paper presents the results of early forecast of spring wheat yields based on data from PlanetScope Dove satellite with spatial (3 m) resolution operated by Planet Labs. Prediction of spring wheat yield was made in early July in the heading stage – the beginning of flowering through linear regression analysis; the values of the integral under the NDVI curve in different periods of time were used as parameters. A multiple linear regression equation was constructed to predict the yield of spring wheat using eight variables (determination coefficient 0.86; mean square error 3.77). Grain yield map of spring wheat was created using satellite data from PlanetScope with spatial (3 m) resolution. The resulting map made it possible to reveal the heterogeneity of the yield within the experimental field. Studies have shown a good relationship between the NDVI integral and the actual yield obtained at the end of the growing season. Therefore, the intermediate results of intraseasonal measurements can be used to adjust the ratio of fertilizers.

Keywords: precision farming, yield, growing season, spring wheat, PlanetScope