# Оценка пространственного распределения урожайности ярового ячменя (Красноярский край) по наземным и спутниковым спектрофотометрическим данным

И. Ю. Ботвич<sup>1</sup>, Д. В. Емельянов<sup>1</sup>, А. А. Ларько<sup>1</sup>, Н. О. Мальчиков<sup>1</sup>, В. К. Ивченко<sup>2</sup>, Т. Н. Демьяненко<sup>2</sup>, А. П. Шевырногов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт биофизики СО РАН, Красноярск, 660036, Россия E-mail: irina.pugacheva@mail.ru <sup>2</sup> Красноярский государственный аграрный университет Красноярск, 660049, Россия E-mail: v.f.ivchenko@mail.ru

В статье представлен метод оценки пространственного распределения урожайности ярового ячменя, реализованный на основе использования оптических наземных и спутниковых спектральных данных спутников серии Dove (PlanetScope) компании Planet Labs с пространственным разрешением 3 м. Этот подход является весьма актуальным при разработке технологий точного земледелия. Картирование урожайности осуществляется на основе данных по пространственному распределению фактической урожайности и спектральных оптических характеристик. Особенностью метода является использование интеграла значений вегетационных индексов (NDVI, MSAVI2, ClGreen) на различных стадиях развития посевов. Тестирование метода выполнено на базе стационарного полевого опыта, где традиционное земледелие (глубинная вспашка) сравнивается с ресурсосберегающими технологиями (плоскорезной, поверхностной обработками и прямым посевом при нулевой обработке почвы). Выполнено прогнозирование урожайности ячменя в конце июля 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 ячменя при семи переменных (коэффициент детерминации — 0,73; среднеквадратическая ошибка — 1,5). Построено пространственное распределение (карта) урожайности ячменя по спутниковым (PlanetScope) и наземным данным. Полученные карты урожайности будут использоваться при планировании сельскохозяйственных работ следующего года.

Ключевые слова: точное земледелие, урожайность, вегетационный период, спектрорадиометр, ячмень, виды обработки почвы, PlanetScope

Одобрена к печати: 08.08.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-183-193

## Введение

Картирование урожайности — это элемент системы точного земледелия, который позволяет определить неоднородность одного из важнейших показателей: урожайности сельскохозяйственных культур (Колесник, Колесников, 2017). Карта урожайности сельскохозяйственных культур является основой дифференцированного внесения удобрений при точном земледелии (Рудашко и др., 2013). Она позволяет идентифицировать зоны с невысокой урожайностью для целенаправленного изучения причин её снижения на данном участке поля и принятия соответствующих мер для решения этой проблемы (Казаров и др., 2016).

Построение цифровых карт полей возможно с использованием спутниковой информации высокого пространственного и временного разрешения. В настоящее время непрерывный мониторинг посевов сельскохозяйственных культур с высоким пространственным разрешением (3 м) и ежедневными измерениями обеспечивает самая большая в мире спутниковая группировка PlanetScope компании Planet Labs (Planet Team, Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth, San Francisco, CA, 2018, URL: https://api.planet.com). Система предоставляет данные, позволяющие оценить состояние сельскохозяйственных культур в течение всего периода вегетации. Цель исследования — разработка метода построения карт урожайности по спутниковым данным PlanetScope.

### Объект и методы исследования

Исследования проводились на землях ООО «Учебно-опытное хозяйство «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края в течение вегетационного периода 2018 г. На *рис. 1* представлено месторасположение опытного поля и его структура. Опытное поле состоит из пяти полос. Их средняя протяжённость — 650 м. Полосы расположены с запада на восток, ширина каждой — 20 м. Внесение удобрений производилось по северной части каждой полосы (шириной 10 м), южная оставалась без удобрений. Каждая полоса засеяна определённым видом сельскохозяйственных культур. В работе представлен анализ и результаты обработки данных по полосе № 5, засеянной ячменём «Ача». Посев ячменя проведён 19 мая. В прошедшем 2017 г. на данной полосе производился посев пшеницы. В полевом опыте применяли минеральное азотное удобрение — аммиачную селитру. Доза внесения составляла 34,7 кг/га д. в. Удобрения вносили одновременно с посевом ячменя сеялкой Agrator-4800M. Все полосы разделили на четыре тестовых участка в соответствии с видами обработки почв:

- *а* вспашка (ПН-5-35 на 20-22 см);
- *b* плоскорезная обработка (КПШК-3,8 на 20–22 см);
- *с* поверхностная обработка (дискатор БДШ-5,6 на 8–10 см);
- *d* прямой посев при нулевой обработке почвы (Agrator-4800M).



*Рис. 1.* Месторасположение опытного поля учебного хозяйства «Миндерлинское» и его структура по видам обработки, культурам. Линии белого цвета указывают на границы разных видов обработки почвы

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

Учёт урожайности зерна ячменя проводили сплошным методом с помощью комбайна в шестикратной повторности на каждом виде обработки почв. Урожайность зерна рассчитывали в центнерах с 1 га с учётом пересчёта на 14%-ю влажность и 100%-ю чистоту.

Полевое спектрометрирование выполнялось пять раз в течение вегетационного периода 2018 г. (*рис. 2*, см. с. 185). Расстояние между измерениями составило около 50 м.

При проведении полевой спектрометрии использовался спектрорадиометр Spectral Evolution PSR-1100F. Выходные данные — коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Для получения КСЯ ( $\rho(\lambda)$ ) растительного сообщества производилась последовательная съёмка яркости ортотропной поверхности отражательного эталона ( $B_o(\lambda)$ ) и яркости исследуемого объекта ( $B(\lambda)$ ). Измерения проводились в ясную погоду с 11:00 до 15:00 по местному времени, что на данной широте обеспечивало мало изменяющиеся допустимые условия освещения объектов (Ботвич и др., 2018). Положение спектрорадиометра относительно измеряемой площадки всегда устанавливалось в надир. В ходе спектрометрирования производилась спектральная и контрольная фотосъёмки площадок диаметром около 50 см.



Рис. 2. Фотоизображения посева ячменя в разные фазы вегетации

Расположение почвенных разностей на каждом исследуемом тестовом участке определялось по его местоположению на почвенной карте, предоставленной сотрудниками Красноярского государственного аграрного университета. Почвы названы в соответствии с современной классификацией (Шишов и др., 2004).

Почвенный покров исследуемой полосы поля неоднороден и представлен четырьмя почвенными контурами:

- АЧги' + (АЧкм') агрочернозёмы глинисто-иллювиальные и криогенно-мицеллярные маломощные;
- АЧги' + (АЧкм') + <АЧгио''> агрочернозёмы глинисто-иллювиальные маломощные в комплексе (25–50%) с агрочернозёмами криогенно-мицеллярными маломощными и агрочерноземами глинисто-иллювиальными оподзоленными среднемощными (до 10%);
- АЧги' + (АЧги''') + <АЧкм'> агрочернозёмы глинисто-иллювиальные маломощные в комплексе (25–50 %) с агрочернозёмами глинисто-иллювиальными мощными и агрочернозёмами криогенно-мицеллярными маломощными (до 10 %);
- АЧги' + [АЧкм'] агрочернозёмы глинисто-иллювиальные маломощные в комплексе (10–25 %) с агрочернозёмами криогенно-мицеллярными маломощными.

Исследование основывается на спутниковых данных PlanetScope с пространственным разрешением 3 м. На этапе предварительной обработки производилась их атмосферная коррекция. Корректирующие коэффициенты для каждого канала присутствуют в метаданных каждой сцены.

| Индекс  | Формула расчёта                                   |  |  |  |  |
|---------|---|--|--|--|--|
| NDVI    | $\frac{b4-b3}{b4+b3}$                             |  |  |  |  |
| VARI    | $\frac{b2-b3}{b2+b3-b1}$                          |  |  |  |  |
| MSAVI2  | $\frac{2(b4+1) - \sqrt{(2b4+1)^2 - 8(b4-b3)}}{2}$ |  |  |  |  |
| ClGreen | $\frac{b4}{b2}-1$                                 |  |  |  |  |

Расчёт спектральных индексов по спутниковым (PlanetScope) и наземным (Spectral Evolution PSR-1100F) данным

Примечание: b1-b4 для спутниковой информации — величины спектрального отражения (СКО) соответствующих каналов (1–4) PlanetScope; для наземных измерений — усреднённые значения КСЯ: b1 — в пределах длин волн от 455 до 515 нм, b2 — от 500 до 590 нм, b3 — от 590 до 670 нм, b4 — от 780 до 860 нм

По спутниковым и наземным спектрофотометрическим данным проводился расчёт спектральных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Jordan, 1969), VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) (Gitelson et al., 2002), MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) (Qi et al., 1994), ClGreen (Green chlorophyll index) (Dall'Olmo et al., 2005) (*maблица*).

## Результаты и обсуждение

Экологические условия формирования урожая ячменя в год исследований отличались от среднемноголетних данных. Вегетационный период 2018 г. был отмечен крайне неравномерным распределением атмосферных осадков, повышенной среднемесячной температурой воздуха в июне и августе и в целом характеризовался как неблагоприятный для возделывания зерновых культур.

В зависимости от наличия удобрительного фона и способа обработки варьируется изменчивость фактической урожайности ячменя (*puc. 3*). Наибольшая урожайность зафиксирована на варианте с отвальной вспашкой (25,9 ц/га (удобренный фон) и 23,7 ц/га (неудобренный фон)), наименьшая — на варианте с поверхностной обработкой (19,7 ц/га (удобренный фон) и 15,8 ц/га (неудобренный фон)). По всем видам обработок внесение минеральных удобрений привело к повышению урожайности зерна ячменя.



*Рис. 3.* Урожайность посевов ячменя, построенная по наземным данным по итогам учёта урожая (*a* — вспашка; *b* — плоскорезная обработка; *c* — поверхностная обработка; *d* — прямой посев при нулевой обработке почвы)

Оценка фактической урожайности на поле — важный показатель эффективности сельскохозяйственного производства. Определение пространственного распределения (картограмм) урожайности является более информативным признаком, позволяющим выявлять неоднородность уровня урожайности в пределах одного поля. Количественной характеристикой состояния посевов служат вегетационные индексы, в том числе NDVI, MSAVI2, ClGreen. В ряде работ подтверждена устойчивая корреляционная связь между NDVI и урожайностью (Акинчин и др., 2017; Антонов, 2018; Бондур и др., 2013; Толпин и др., 2007). Для определения связи между исследуемыми индексными величинами и урожайностью посева ячменя рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r) между этими переменными. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в период созревания наибольшая величина r (0,87) достигается при анализе связи значений NDVI, MSAVI2 с урожайностью ячменя. Установлено, что теснота связи урожайности и вегетационных индексов увеличивается с каждой последующей фазой развития (выход в трубку – фаза молочной спелости — фаза полной спелости): 0,25–0,55–0,87 для NDVI; 0,24–0,52–0,87 для MSAVI2; 0,29–0,59–0,7 для ClGreen; 0,18–0,48–0,16 для Vari.

Изучение пространственной изменчивости индексных величин позволяет оценивать вариабельность почвенного плодородия и снижать дозы удобрений на относительно плодородных внутрипольных участках или увеличивать дозы на менее плодородных элементарных участках. Это создаёт условия для более равномерного развития и созревания растений, снижает потери урожая, приводит к повышению качества и уменьшению себестоимости продукции (Бобкова, Лобков, 2017). На *рис. 4* представлено пространственное изменение значений NDVI по данным Spectral Evolution.



*Рис. 4.* Картограмма значений NDVI посевов ячменя в течение периода вегетации (со 2 июня по 7 сентября 2018 г.), построена посредством интерполяции по наземным спектрофотометрическим данным. Белыми линиями обозначено разделение на фоны (удобренные/неудобренные) и виды обработки (*a*, *b*, *c*, *d*)

Несмотря на ограниченные возможности наземных спектральных измерений, выявлена их тесная связь с урожайностью. Поэтому использование наземной информации является важным элементом в системе оптических спектральных измерений на различных высотных уровнях. Наземные спектральные измерения показали пространственную неоднородность распределения NDVI. Из рис. 4 видно, что существует изменчивость распределения NDVI во времени начиная со 2 июня и заканчивая 7 сентября 2018 г. В то же время можно отметить, что по результатам измерений, проведённым в одну дату, наблюдаются различные величины NDVI на разных вариантах обработки почвы. Полученная информация свидетельствует о следующих свойствах: низкое пространственное и временное разрешение, высокая спектральная изменчивость. Наличие такого вида пространственных данных, полученных по точечным измерениям, приводит к необходимости использования спутниковой пространственной информации более высокого разрешения. Доступная спутниковая информация подобного типа может быть получена с помощью PlanetScope. Использование спутниковой информации PlanetScope обеспечивает определение состояния растительности в отдельные фазы роста и развития. Отражательная способность сельскохозяйственных объектов может оцениваться по различным вегетационным индексам и в дальнейшем обеспечить, с учётом дополнительных параметров, оценку фитомассы.

Построение карт пространственного распределения индексных величин высокого пространственного разрешения в течение периода вегетации является неотъемлемой частью точного земледелия.

Сравнение *рис.* 4 и 5 (см. с. 188) показывает, что информация, полученная по данным PlanetScope, принципиально отличается от точечных наземных измерений и даёт возможность оценки мелкомасштабной неоднородности величин NDVI. А это, в свою очередь, позволяет перейти к выявлению связи пространственной неоднородности NDVI и урожайности. В качестве базовой характеристики, которая используется в дальнейшем, принято изменение величин вегетационных индексов в течение вегетационного периода. Основным параметром, который используется в дальнейшей работе, является NDVI. В течение вегетационного периода величина NDVI претерпевает значительные изменения от 0,1 до 0,8. Типичная кривая NDVI в течение вегетационного периода — это рост в начале, максимальные значения в середине и снижение в конце периода вегетации. Такая форма представления этой величины позволяет рассчитать интеграл под кривой вегетационного индекса (Jayawardhana, Chathurangeb, 2016; Zhou et al., 2013).

| Пото       | 4                 | 2                     | h                     | 2                                     |       |       |
|------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------|-------|
| дата       | a                 | C                     | D                     | a                                     | МИН   | макс  |
| 04.06.2018 |                   | E.                    | Carline Co.           |                                       | 0,13  | 0,21  |
| 13.06.2018 |                   |                       | STANS N               |                                       | 0,14  | 0,24  |
| 18.06.2018 | 66.5 <b>8</b> 5.6 | 80-10 Al-10           | 8 ge 🔨 🖕 🖌 🖓          |                                       | 0,254 | 0,391 |
| 23.06.2018 |                   | C) (C) (C)            | 16-10 A 10 10 10 10   | 4998 - PUT                            | 0,34  | 0,54  |
| 26.06.2018 |                   | 099 S 879,            | AND LAKEN AND         |                                       | 0,34  | 0,495 |
| 02.07.2018 |                   |                       | 1100.11.17.0044       | 2                                     | 0,377 | 0,549 |
| 16.07.2018 |                   |                       | Obs. 1 Obs            | <b>)) </b>                            | 0,395 | 0,56  |
| 31.07.2018 |                   |                       |                       |                                       | 0,375 | 0,52  |
| 08.08.2018 |                   | gente digte (an state | HORE OF THE REAL      |                                       | 0,325 | 0,46  |
| 17.08.2018 |                   | The second state      | ons the codding       |                                       | 0,23  | 0,35  |
| 21.08.2018 |                   | alaanada 4.5          | 0 - 200 MA            | 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 | 0,145 | 0,26  |
| 26.08.2018 |                   | *#****                | 16 - 16 - 16 - 16 - 1 | unter the and                         | 0,17  | 0,275 |
| 05.09.2018 |                   | AT A SPILL            | 126-25 1752           | MARK BALLER                           | 0,12  | 0,3   |
| 20.09.2018 |                   |                       |                       | 100.00 20 4.                          | 0,165 | 0,295 |

*Рис. 5.* Пространственное изменение значений NDVI посевов ячменя с 4 июня по 20 сентября 2018 г. Белыми линиями обозначено разделение на виды обработки (*a*, *b*, *c*, *d*)

В практических целях возможно использование не полного интеграла от начала до конца вегетационного периода, а его начальной части. Чем раньше рассчитывается прогноз урожайности, тем он более значим для практических целей. Отсюда следует, что необходимо найти оптимальную дату конечного времени для расчёта интеграла вегетационного периода, которая к тому же обеспечивает достаточную точность прогноза.

Расчёт криволинейного интеграла исследуемых индексов (І) проводился по формуле:

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

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

Анализ связи между урожайностью и величиной интеграла в разные периоды вегетации показал, что с середины июля коэффициент *r* достигает достаточно высоких значений (более 0,7) для индексов NDVI, MSAVI2, ClGreen (*puc. 6*, см. с. 189). Максимальные величины достигнуты к началу августа. Коэффициенты корреляции, рассчитанные со 2 июля по 5 сентября, являются достоверными при уровне значимости 0,05. Таким образом, продемонстрировано, что использование интегральных показателей позволяет выполнять прогноз урожайности ячменя в фазе цветения — молочной спелости. Индекс VARI показал достаточно низкую корреляционную зависимость с урожайностью и не может быть использован для целей прогнозирования.

На *рис.* 7 (см. с. 189) даны картограммы значений интеграла NDVI посевов ячменя в течение периода вегетации с 4 июня по 5 сентября 2018 г., полученные по данным PlanetScope. При анализе картограмм очевидна разница с информацией, представленной на *рис.* 5.

Представление информации в форме накопленных значений интегралов NDVI показывает, что по сравнению с пространственным изменением прямых значений NDVI появляется устойчивая во времени структура при определённых видах обработки (*d* и *a*). В то же время проявляется чёткая зависимость изменений пространственной структуры интегралов NDVI от видов обработки c и b. При обработке вида c ярко выраженная с 4 по 13 июня величина интеграла уменьшается к 8 августа, исчезает, и весь участок становится почти равномерным. То же самое происходит при обработке типа b, но разница между началом и концом меньше, чем при обработке вида c.



*Рис. 6.* Коэффициенты корреляции между урожайностью ячменя и величиной интеграла индексов NDVI, MSAVI2, VARI, ClGreen, рассчитанных по данным PlanetScope в различные фазы роста и развития растений (I — всходы; II — кущение; III — выход в трубку; IV — колошение; V — цветение; VI — фаза молочно-восковой спелости; VII — фаза полной спелости)

| да         | та         | d          | c                                       | b            | а  |       |       |
|------------|------------|------------|---|--------------|--|-------|-------|
| начало     | конец      |            |   |              |  | МИН   | макс  |
| 04.06.2018 | 13.06.2018 |            | le in the second second                 | 2 2 4 5 A 10 |  | 1,55  | 2,15  |
| 04.06.2018 | 18.06.2018 |            | A to be a set of the                    | 0 B = - 0 \$ | - 13 . J. J | 3,47  | 4,85  |
| 04.06.2018 | 23.06.2018 | 24 - C     |   | 40 0N        |  | 4,9   | 7     |
| 04.06.2018 | 26.06.2018 |            | 100 m (1) 10                            | A 0 - 0 Y    |  | 6,95  | 9,55  |
| 04.06.2018 | 02.07.2018 |            | Gar (da 😭                               |              |  | 8,35  | 11,1  |
| 04.06.2018 | 16.07.2018 |            | Ger                                     |              |  | 10,9  | 14,4  |
| 04.06.2018 | 31.07.2018 |            | 8 1 1 A B                               |              |  | 16,85 | 21,7  |
| 04.06.2018 | 08.08.2018 |            | 19-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1- |              |  | 22,55 | 28,45 |
| 04.06.2018 | 17.08.2018 | ک کی والیک |   | - •          |  | 25,1  | 31,45 |
| 04.06.2018 | 21.08.2018 |            | Care of the last                        |              | 2000 - Mar                                   | 27,4  | 33,7  |
| 04.06.2018 | 26.08.2018 |            | titter tes                              | e 10         | (1999) - S. 1997                             | 27,9  | 34,5  |
| 04.06.2018 | 05.09.2018 |            | Contractor and the                      |              | Carto Maria Par                              | 28,4  | 35,8  |

*Рис.* 7. Картограммы значений интеграла NDVI посевов ячменя в течение периода вегетации (с 4 июня по 5 сентября 2018 г.), полученные по данным PlanetScope. Белыми линиями обозначено разделение на виды обработки (*a*, *b*, *c*, *d*). Раскраска картограмм выполнена с использованием одной цветовой шкалы для всех дат исследований. Минимальные и максимальные значения цветовых шкал представлены в таблице напротив соответствующей картограммы

Следует отметить, что на участке с обработкой вида d чётко выделяется определённая зона (область красного цвета). При анализе микровысот местности, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата, было установлено, что в этой зоне существует понижение высоты на 1 м. Линейный размер данного участка составляет примерно 60 м. Можно предположить, что увеличение интеграла NDVI в указанном месте связано с повышенным содержанием влаги в почве. Также вероятно, что динамика пространственного распределения интегралов NDVI на других участках связана не только с изменением влажности, обусловленной микрорельефом, но и с типом почвы и видом её обработки.

Для прогнозирования урожайности ячменя в конце июля (цветение) 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 урожайности отдельных участков размером 180 м<sup>2</sup>. Величина урожайности на данных участках определялась в ходе уборки с помощью зерноуборочного комбайна TERRION. Значения NDVI — данные PlanetScope. Усреднение NDVI проводилось по группе пикселей, попадающих в анализируемый участок. Множественная линейная модель для прогноза ячменя при семи переменных имеет вид (коэффициент детерминации — 0,73; среднеквадратическая ошибка — 1,5):

$$\begin{split} Y = & -1,71 + 20,72I_{\text{NDVI}_{1}} - 36,28I_{\text{NDVI}_{2}} + 62,82I_{\text{NDVI}_{3}} - 153,74I_{\text{NDVI}_{4}} + \\ & + 156,75I_{\text{NDVI}_{5}} - 62,03I_{\text{NDVI}_{6}} + 15,44I_{\text{NDVI}_{7}}, \end{split}$$

где *Y*— урожайность, *I*<sub>NDVI,</sub> — значения интеграла NDVI в отдельные периоды времени (*i*). Проведённые расчёты позволили построить картограмму урожайности исследуемого участка. На puc. 8 (I) показано фактическое распределение урожайности. Карта урожайности построена для каждого участка с учётом вида обработки и фона (удобренные/неудобренные) посредством интерполяции прямых измерений (шесть точек), полученных в ходе уборки. На рис. 8 (II) показано пространственное распределение.



*Рис. 8.* Карта урожайности поля ячменя, полученная по наземным данным (I) и результатам модельного расчёта (II)

Сопоставление картограмм I и II на *рис. 8* показывает подобие пространственного распределения урожайности. В дальнейшем планируется использовать полученные карты при дифференцированном внесении удобрений, отборе почвенных образцов. Дифференцированное внесение удобрений позволит повысить эффективность применяемых удобрений и выровнять урожайность культуры в пределах поля.

#### Заключение

Использование карт урожайности позволяет определять участки с пониженным показателем урожайности. Установлено, что интеграл, вычисляемый под кривой индекса (изменчивость площади под кривой), можно рассматривать как параметр, связанный с урожайностью. Анализ связи между урожайностью и величиной интеграла в разные периоды вегетации показал, что с середины июля коэффициент r достигает достаточно высоких значений (более 0,7 при уровне значимости 0,05) для индексов NDVI, MSAVI2, ClGreen. Максимальные величины достигнуты к первым числам августа.

В результате проведённых исследований выполнено построение пространственного изменения значений NDVI поля ячменя со 2 июня по 20 сентября 2018 г. по спутниковым и наземным данным. Получено пространственное изменение интеграла NDVI поля ячменя в течение периода вегетации (с 4 июня по 5 сентября 2018 г.) по спутниковым данным.

Разработан метод оценки пространственного распределения урожайности ярового ячменя, реализованный на основе использования оптических наземных и спутниковых спектральных данных (PlanetScope с пространственным разрешением 3 м).

Выполнено прогнозирование урожайности ячменя в конце июля 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 ячменя при семи переменных (коэффициент детерминации — 0,73; среднеквадратическая ошибка — 1,5).

Построено пространственное распределение (карта) урожайности ячменя по спутниковым (PlanetScope) и наземным данным. Полученные карты будут использоваться при планировании сельскохозяйственных работ следующего года.

Практическая значимость представленной работы заключается в том, что показанный в ней подход позволяет использовать спектральные оптические данные для раннего прогнозирования урожайности. Максимальный срок от момента прогнозирования до момента уборки урожая оценивается по разности между модельными оценками и реальными величинами урожайности. Мониторинг полей оптическими методами в течение вегетационного периода позволяет выбрать оптимальный срок для прогнозирования урожайности.

Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках реализации проекта «Разработка и апробация методов контроля земель сельскохозяйственного назначения для создания системы точного земледелия».

#### Литература

- 1. Акинчин А. В., Левшаков Л. В., Линков С. А., Ким В. В., Горбунов В. В. Информационные технологии в системе точного земледелия // Вестн. Курской гос. с.-х. акад. 2017. № 9. С. 16–21.
- 2. *Антонов С.А.* Роль геоинформационных технологий и дынных дистанционного зондирования Земли для оценки состояния и продуктивности агроландшафтов // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2018. Т. 73. № 5. С. 10–14.
- 3. *Бобкова Ю.А., Лобков В. Т.* Использование технологий точного земледелия при создании агрохимических картограмм // Вестн. Орловского гос. аграрного ун-та. 2017. Т. 67. № 4. С. 25–31.
- 4. *Бондур В. Г., Гороховский К. Ю., Игнатьев В. Ю., Мурынин А. Б., Гапонова Е. В.* Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации // Изв. высших учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 61–68.
- 5. *Ботвич И. Ю., Письман Т. И., Кононова Н. А., Шевырногов А. П.* Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
- Казаров К. Р., Солдатов Ю. И., Трофимова Т.А. Повышение точности картирования урожайности при уборке зерновых культур комбайном John Deere 9670 STS // Современные научно-практические решения XXI века: материалы Международ. научно-практ. конф. 21–22 дек. 2016, Воронеж. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. С. 299–304.
- Колесник Д. Е., Колесников В. Н. Картирование урожайности как элемент системы точного земледелия // Современные тенденции развития технологий и технических средств в сельском хозяйстве: материалы Международ. научно-практ. конф., посвящённой 80-летию А. П. Тарасенко. 10 янв. 2017, Воронеж. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. С. 190–194.
- 8. *Рудашко А.А., Прохорова Ю.С., Ярмоленко А.С.* Модель урожайности сельскохозяйственных культур как базис цифровой карты в технологии точного земледелия // Изв. высших учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 4. С. 86–90.
- 9. Толпин В.А., Барталев С.А., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Прошин А.А., Флитман Е. В. Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использованием данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 380–389.

- 10. Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России: монография. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Dall'Olmo G., Gitelson A.A., Rundquista D.C., Leavitt B., Barrow T., Holz J.C. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 96. P. 176–187.
- 12. *Gitelson A.A., Stark R., Grits U., Rundquist D., Kaufman Y., Derry D.* Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. P. 2537–2562.
- 13. Jayawardhana W.G.N.N., Chathurangeb V.M.I. Extraction of agricultural phenological parameters of Sri Lanka using MODIS, NDVI time series data // Procedia Food Science. 2016. V. 6. P. 235–241.
- 14. *Jordan C. F.* Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // Ecology. 1969. V. 50. P. 663–666.
- 15. *Qi J.*, *Chehbouni A.*, *Huete A. R.*, *Kerr Y. H.*, *Sorooshian S.* A modified soil adjusted vegetation index // Remote Sensing of Environment. 1994. V. 48. P. 119–126.
- *Zhou F., Zhang A., Townley-Smith L.* A data mining approach for evaluation of optimal time-series of MODIS data for land cover mapping at a regional level // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. V. 83. P. 114–129.

## Estimation of the spatial distribution of spring barley yield (Krasnoyarsk Territory) from ground and satellite spectrophotometric data

I. Yu. Botvich<sup>1</sup>, D. V. Emelyanov<sup>1</sup>, A. A. Larko<sup>1</sup>, N. O. Malchikov<sup>1</sup>, V. K. Ivchenko<sup>2</sup>, T. N. Demyanenko<sup>2</sup>, A. P. Shevyrnogov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

<sup>2</sup> Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk 660049, Russia E-mail: v.f.ivchenko@mail.ru

The paper presents a method for estimating the spatial distribution of spring barley yield, implemented based on the use of optical ground and satellite spectral data (PlanetScope with a spatial resolution of 3 meters). This approach is highly relevant for the development of precision farming technologies. Yield mapping is carried out on the basis of the data on spatial distribution of actual yield and spatial distribution of spectral optical characteristics. A feature of the method is the use of the integral values of vegetation indices (NDVI, MSAVI2, ClGreen) at various stages of crop development. Testing of the method was performed on the basis of stationary field experience, when traditional agriculture (deep plowing) was compared with resource-saving technologies (flat-cut, surface treatments and direct seeding at zero tillage). As a result, a method for estimating the spatial distribution of spring barley yield, implemented using optical ground and satellite spectral data (PlanetScope with a spatial resolution of 3 meters) was developed. The prediction of barley yields at the end of July on the basis of a linear regression model was performed, the values of the integral under the NDVI curve in different periods of time were used as parameters. The type of a multiple linear model for predicting barley with 7 variables was established (the coefficient of determination is 0.73; the root-mean-square error is 1.5). The spatial distribution of barley yield by satellite (PlanetScope) and ground data was mapped. The resulting yield maps will be used when planning work for the next year.

Keywords: precision farming, crop yield, growing season, spectroradiometer, barley, types of tillage, PlanetScope

Accepted: 08.08.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-183-193

## References

- 1. Akinchin A. V., Levshakov L. V., Linkov S. A., Kim V. V., Gorbunov V. V., Informatsionnye tekhnologii v sisteme tochnogo zemledeliya (Information technology in precision agriculture), *Vestnik Kurskoi gosudarst-vennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 2017, No. 9, pp. 16–21.
- 2. Antonov S.A., Rol' geoinformatsionnykh tekhnologii i dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya otsenki sostoyaniya i produktivnosti agrolandshaftov (The role of geographic information technologies and remote sensing of the Earth for the assessment of the state and productivity of agrolandscapes), *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, Vol. 73, No. 5, pp. 10–14.
- 3. Bobkova Yu.A., Lobkov V.T., Ispol'zovanie tekhnologii tochnogo zemledeliya pri sozdanii agrokhimicheskikh kartogramm (Using technologies of precision farming for creation agrochemical cartograms), *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, Vol. 67, No. 4, pp. 25–31.
- 4. Bondur V. G., Gorokhovskii K. Yu., Ignat'ev V. Yu., Murynin A. B., Gaponova E. V., Metod prognozirovaniya urozhainosti po kosmicheskim nablyudeniyam za dinamikoi razvitiya vegetatsii (The method of forecasting yield productivity based on space observation for dynamics of vegetation development), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos''emka*, 2013, No. 6, pp. 61–68.
- 5. Botvich I. Yu., Pisman T. I., Kononova N. A., Shevyrnogov A. P., Sezonnaya dinamika rastitel'nosti zalezhnykh zemel' Krasnoyarskoi lesostepi po nazemnym i sputnikovym dannym (Seasonal dynamics of fallow land vegetation in Krasnoyarsk forest steppe according to ground and satellite data), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 6, pp. 39–51.
- Kazarov K. R., Soldatov Yu. I., Trofimova T. A., Povyshenie tochnosti kartirovaniya urozhainosti pri uborke zernovykh kul'tur kombainom John Deere 9670 STS (Increasing the mapping yield accuracy when harvesting grain crops with a John Deere 9670 STS), *Sovremennye nauchno-prakticheskie resheniya XXI veka* (Modern scientific and practical solution of the XXI century), Proc. Intern. Scientific-Practical Conf., 21– 22 Dec. 2016, Voronezh, 2016, pp. 299–304.
- Kolesnik D. E., Kolesnikov V. N., Kartirovanie urozhainosti kak element sistemy tochnogo zemledeliya (Yield mapping as an element of precision farming system), *Sovremennye tendentsii razvitiya tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv v sel'skom khozyaistve* (Modern trends in the development of technologies and technical means in agriculture), Proc. Intern. Scientific-Practical Conf. Dedicated to the 80<sup>th</sup> Anniversary of A. P. Tarasenko, 10 Jan. 2017, Voronezh, 2017, pp. 190–194.
- 8. Rudashko A.A., Prokhorova Yu.S., Yarmolenko A.S., Model' urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur kak bazis tsifrovoi karty v tekhnologii tochnogo zemledeliya (Model of the agricultural crops yield as a basis of digital map in the technology of precision farming), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*. *Geodeziya i aerofotos''emka*, 2013, No. 4, pp. 86–90.
- Tolpin V.A., Bartalev S.A., Burtsev M.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Mazurov A.A., Matveev A.M., Proshin A.A., Flitman E.V., Otsenka sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove mezhgodovoi dinamiki s ispol'zovaniem dannykh MODIS (Estimation of the agricultural crops condition based on annual dynamics using MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 380–389.
- 10. Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Soil classification and diagnostics in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 341 p.
- 11. Dall'Olmo G., Gitelson A.A., Rundquista D.C., Leavitt B., Barrow T., Holz J.C., Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 96, pp. 176–187.
- 12. Gitelson A.A., Stark R., Grits U., Rundquist D., Kaufman Y., Derry D., Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, pp. 2537–2562.
- 13. Jayawardhana W. G. N. N., Chathurangeb V. M. I., Extraction of agricultural phenological parameters of Sri Lanka using MODIS, NDVI time series data, *Procedia Food Science*, 2016, Vol. 6, pp. 235–241.
- 14. Jordan C. F., Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, 1969, Vol. 50, pp. 663–666.
- 15. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian S., A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 1994, Vol. 48, pp. 119–126.
- Zhou F., Zhang A., Townley-Smith L., A data mining approach for evaluation of optimal time-series of MODIS data for land cover mapping at a regional level, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, Vol. 83, pp. 114–129.