

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИЗУЧЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛЬНОГО ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ И РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

© 2012 г. И. Ю. Ботвич^{1*}, А. Ф. Сидько¹, Т. И. Письман^{1,2}, А. П. Шевырнов^{1,2}

¹Учреждение Российской академии наук Институт биофизики Сибирского отделения РАН, Красноярск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

*E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2011 г.

Представлена новая методика оценки потенциальной урожайности посевов с.-х. культур на основе использования хлорофилльного фотосинтетического потенциала (ХФСП), вычисляемого по спутниковым данным. ХФСП определяется концентрацией пигментов (в основном хлорофилла и каротиноидов) и внутренней структурой тканей растений. Величина параметра ХФСП рассчитывается как площадь треугольника, координатами вершин которого являются значения спектрального отражения в зеленом, красном и ближнем инфракрасном каналах, и средние значения длин волн в соответствующих каналах. Проведено изучение ХФСП с.-х. культур в течение вегетационного периода по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения (MODIS/Terra и Landsat 7 ETM+). Определена степень взаимосвязи ХФСП и урожайности культур. Полученные спутниковые оценки хорошо согласуются с наземными наблюдениями.

Ключевые слова: хлорофилльный фотосинтетический потенциал, спутниковые данные, сельскохозяйственные культуры

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими задачами спутникового мониторинга растительных покровов суши являются: идентификация с.-х. угодий, определение их видового состава (Foody, Cox, 1994; Erol, Akdeniz, 1996; Grignetti et al., 1997) и морфофизиологических характеристик растений (Терехов, 2011; Huete, 1986; Roberts et al., 1993; Pax-Lenney, Woodcock, 1997; MacDonald, Hall, 1980; Clevers, 1997). Съемки из космоса не только дают возможность улучшить сбор с.-х. статистики, повышая точность, однородность, объективность и частоту наблюдений, но и существенно усовершенствовать методы оперативного наблюдения, контроля за состоянием посевов и прогноза урожая (Шевырнов и др., 1996; Santhosh et al., 2003; Султангазин и др., 2004; Gitelson et al., 2005; Барталев и др., 2006).

Отражательная способность растительных покровов несет в себе значительный объем информации о физиологическом состоянии растений. Так, например, интенсивность и спектральный состав света, отраженного растительным покровом, несут информацию о пигментном и видовом составе, влажности растений, состоянии поверхности и архитектонике фитоэлементов. Наибольший вклад в формирование спектрального порт-

рета растительного покрова вносят зеленые пигменты — хлорофиллы. Известно, что до 95% вариаций значений спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) растительного покрова в видимом диапазоне является следствием изменения содержания хлорофилла. На долю каротиноидов приходится от 10 до 20% лучистой энергии, поглощенной всеми пигментами, содержащимися в растениях. Отсюда следует, что оценка связей между содержанием хлорофилла и значениями СКЯ растительного покрова имеет практическое значение как для развития методов дистанционного зондирования (ДЗ), так и для детальной интерпретации получаемых дистанционных данных при исследовании урожайности растений (Sid'ko, Shevyrnov, 2000; Сидько, 1997, 2004; Sidko, 2004).

Ранее для поиска количественной взаимосвязи между СКЯ с.-х. посевов и концентрацией хлорофилла-а в листьях верхнего яруса растений было предложено использовать величину хлорофилльного фотосинтетического потенциала (ХФСП) растений (Сидько, Шевырнов, 1998; Сидько, 2003; Sid'ko, 2004). Предложенный оптический дистанционный метод определения ХФСП основывался на данных полевых наземных измерений СКЯ.

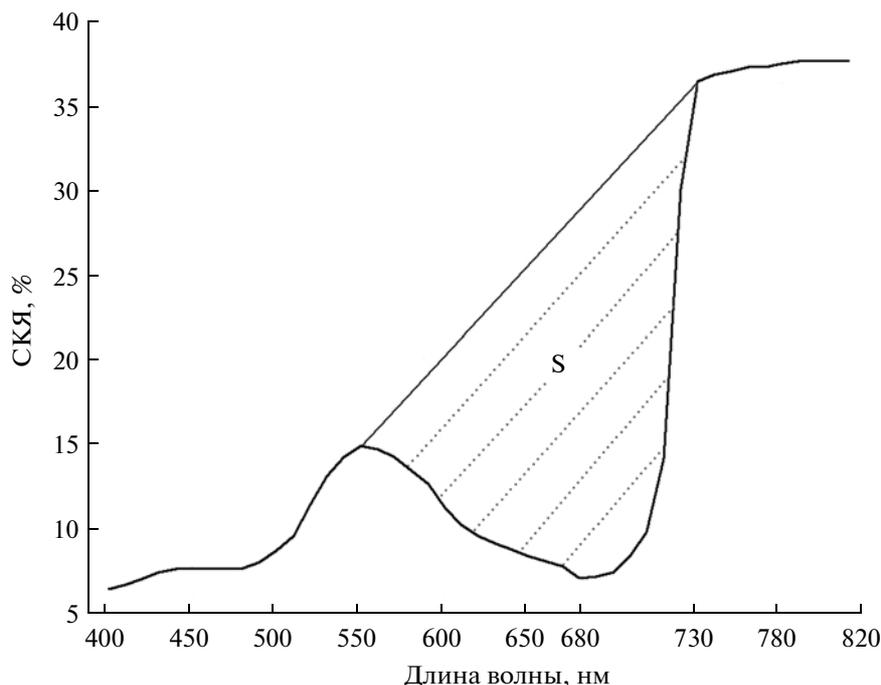


Рис. 1. Зависимость СКЯ посева пшеницы от длины волны.

В настоящей работе представлены результаты оценки возможности определения урожайности посевов с.-х. культур на основе изучения ХФСП, рассчитанного по спутниковым данным.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

- на основе метода расчета величины ХФСП по наземным спектрофотометрическим данным модифицирован метод для расчета величины ХФСП по спутниковым материалам;

- проведено исследование ХФСП посевов с.-х. культур по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения (MODIS/Terra и Landsat 7 ETM+) в течение вегетационного периода;

- установлена степень взаимосвязи ХФСП агроценозов и их урожайностью.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных ранее полевых исследований (Шевырнов и др., 1996; Сидько, Шевырнов, 1998; Sid'ko, Shevyrnogov, 2000; Shevyrnogov et al., 2000; Сидько, 2003, 2004) СКЯ посевов с.-х. культур было установлено, что существует возможность оценки концентрации хлорофилла-*a* в растениях и урожайности посевов по значениям СКЯ растений через параметр S – хлорофилльный фотосинтетический потенциал. Величина хлорофилльного фотосинтетического по-

тенциала (ХФСП) зависит прежде всего от величины поглощенного растениями света в области красной полосы поглощения хлорофилла ($\lambda_{\max} = 680$ нм) в течение вегетационного периода растений (рис. 1). ХФСП наиболее полно отражает взаимосвязь СКЯ с физиологическими и биометрическими параметрами растений. Разработчиками было предложено производить расчет параметра ХФСП по площади “хлорофилльного провала” в интервале длин волн от 550 нм (зеленая область спектра) до 730 нм (ближняя ИК-область спектра), используя следующую формулу:

$$S = 90(\rho_{730}(t) + \rho_{550}(t)) - \int_{550}^{730} \rho(\lambda, t) d\lambda,$$

где ρ_{550} и ρ_{730} – значения СКЯ при $\lambda = 550$ и $\lambda = 730$ нм (при $\lambda_{\max} = 680$ нм); t – границы временного интервала.

Методы изучения отражательной способности растительных объектов по данным наземных спектрофотометрических измерений существенно отличаются от методов, основанных на данных спутниковых измерений. Причиной этого являются изменение оптической толщины атмосферы, облачность, изменение угла визирования сканера, изменение высоты Солнца и т.п. С учетом особенностей спектрального разрешения прибо-

ров ETM+ спутника Landsat 7 и MODIS спутника Terra, для изучения значений ХФСП посевов с.-х. культур используются следующие спектральные диапазоны:

– для MODIS/Terra (при необходимости получения информации с пространственным разрешением 250 м) рекомендуется использовать следующие каналы:

4 канал: 545–565 нм (зеленая область спектра),

1 канал: 620–670 нм (красная область спектра),

2 канал: 841–876 нм (ближняя ИК-область спектра);

– для Landsat 7 ETM+ (пространственное разрешение 30 м):

2 канал: 525–605 нм (зеленая область спектра),

3 канал: 630–690 нм (красная область спектра),

4 канал: 750–900 нм (ближняя ИК-область спектра).

В качестве тестовых участков выбраны с.-х. поля, засеянные пшеницей (*Triticum aestivum L.*), гречихой (*Fagopyrum esculentum*) и овсом (*Avena sativa L.*). Посевы пшеницы и гречихи расположены на территории Минусинского района Красноярского края, посевы овса – на территории Алтайского района республики Хакасия. Выбор этих объектов обусловлен следующими факторами: пшеница, гречиха и овес являются основными культурами, высеваемыми и культивируемыми на большей территории нашей страны. Они к настоящему времени достаточно хорошо изучены с физиологической и биологической точки зрения. Агрофитоценозы изучались на стационарных площадках (общая площадь 5.3 тыс. га) стандартными геоботаническими методами в течение вегетационного сезона 2006 г. (Жукова и др., 2009). Для определения сырой надземной биомассы отбирались пробы для взвешивания с площадок $1 \times 1 \text{ м}^2$ в трех-пятикратной повторности. Координаты участков зарегистрированы с помощью GPS-навигатора.

Чтобы охватить весь период вегетации с.-х. полей на территории Красноярского края и республики Хакасия, использовались снимки MODIS/Terra за период с 10 июня по 10 сентября 2006 г. Особенностью 2006 г. является более позднее начало вегетации растений по сравнению со среднестатистическими показателями для данной территории. Переход среднесуточной температуры воздуха через 5°C наблюдался с 23 апреля, и запаздывание составило приблизительно 14–16 дней.

Для изучения значения ХФСП по спутниковым данным высокого пространственного разрешения, а также для географической привязки тестовых участков использовались спутниковые

данные, полученные Landsat 7 ETM+ 2 сентября 2006 г.

Обработка спутниковых снимков проводилась с помощью программного обеспечения ENVI. Статистическая обработка полученных данных, а также их визуализация (построение графиков), производились в программе Statistica. Для оценки силы связи между изучаемыми параметрами использовался коэффициент корреляции Пирсона.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

Предварительная обработка спутниковых снимков Modis/Terra

Предварительная обработка спутниковых снимков MODIS/Terra проводилась поэтапно. С помощью программы MODIS Reprojection Tool производилось преобразование проекции снимков MOD09GQK и MOD09GHK, из Sinusoidal projection в Universal Transverse Mercator (UTM). В продуктах MOD09 (Surface Reflectance) предоставляются ежедневные данные об отражательной способности земной поверхности. Данные продуктов MOD09 имеют уровень обработки L2G, т.е. выполнены радиометрическая калибровка снимков, радиометрическая коррекция влияния атмосферы. Продукты MOD09 производятся командой “NASA MODIS MODLAND Science Team” и находятся в свободном доступе по адресу <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

Обеспечение возможности анализа развития растительности по спутниковым данным сопряжено с необходимостью построения временных рядов данных наблюдений, очищенных от влияния ряда негативных факторов, к числу которых, прежде всего, относится наличие облачного покрова и теней от облаков. Для детектирования облачного покрова и теней от облаков (построения масок) использовался метод, разработанный Барталевым и др. (Барталев и др., 2006). Полученные маски позволяют исключить из анализа пиксели облаков, теней от облаков, лежащие на границе облачного покрова.

Предварительная обработка спутниковых снимков Landsat 7 ETM+

Для изучения значений ХФСП с.-х. посевов в осенний период был выбран наиболее чистый, с точки зрения облачности, снимок Landsat 7 ETM+ от 2 сентября 2006 г. Данный снимок имеет L1T уровень обработки. Радиометрическая и географическая коррекция снимков была произведена Геологической службой США (U.S. Geological Survey (USGS), EROS Data Center), с исполь-

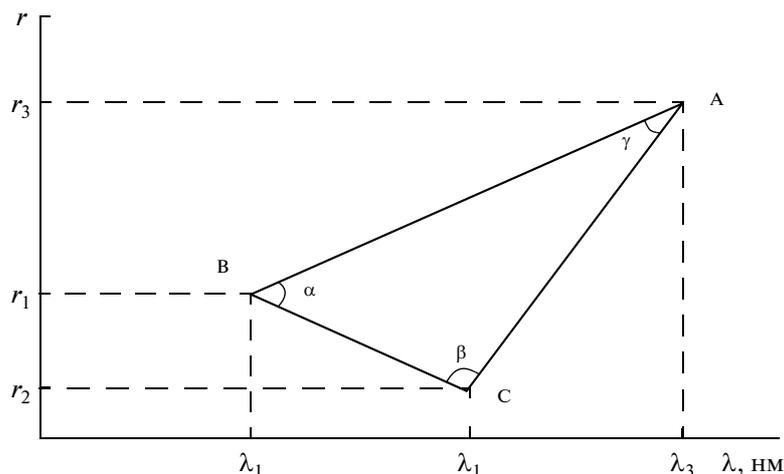


Рис. 2. Схематическое изображение треугольника с вершинами (λ_i, r_i) для расчета ХФСП.

зованием стандартных методов (Irish, 2000). Значения DN (Digital Numbers) пикселей конвертировались в излучение (Spectral Radiance), с использованием возможности программного обеспечения ENVI (модуль TM Calibration Parameters).

Атмосферная коррекция снимков проведена с помощью модуля FLAASH (Fast Line_of_sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Данный модуль разработан корпорацией Spectral Sciences в сотрудничестве с Американской научно-исследовательской лабораторией Воздушных сил (AFRL) и Центром прикладных технологий спектральной информации (SITAC) и включен в программное обеспечение ENVI. Модуль выполняет атмосферную коррекцию, с использованием моделей MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), который учитывает солнечный зенитный угол, угол наблюдения, среднее значение высоты поверхности, и определенные модели атмосферы, типов аэрозолей и дальности видимости. FLAASH производит атмосферную коррекцию и конвертирует значения яркости снимков из Radiance в спектральное отражение (exoatmospheric reflectance).

Идентификация территорий, покрытых облаками, проводилась с помощью алгоритма, предложенного Richard R. Irish (Irish, 2000). Данный алгоритм основывается на двухэтапной обработке данных ETM+. На первом этапе для определения присутствия или отсутствия облаков на изображении используются отражательные и тепловые свойства отдельных пикселей сцены. Если облака присутствуют, то устанавливается конкретный для данной сцены тепловой профиль облачного покрова. На втором этапе производится идентификация оставшихся облаков на сцене пу-

тем использования уникальных тепловых сигнатур для облаков.

ТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

При разработке метода определения ХФСП по спутниковой информации учитывались особенности расчета ХФСП (S) по наземным спектрофотометрическим данным, а также особенности спектральных диапазонов каждого из спутников (Landsat 7 ETM+ и MODIS/Terra). В результате проведенного анализа было установлено, что для определения величины параметра S необходимо рассчитать площадь треугольника, координатами вершин которого являются значения спектрального отражения в зеленом, красном и ближнем ИК-каналах (r_i) и средние значения длин волн (λ_i) в соответствующих каналах (рис. 2).

Площадь треугольника вычисляется с использованием геометрических свойств векторного произведения по формуле

$$S = |(\lambda_2 - \lambda_1)(r_3 - r_1) + (\lambda_3 - \lambda_1)(r_1 - r_2)|/2,$$

где λ_i – длина волны; r_i – значение спектрального отражения; $i = 1, 2, 3$.

При сравнительном анализе значений ХФСП нескольких тестовых участков, если не стоит задача получения количественных значений ХФСП, необходимо использовать нормализованный ХФСП (S_{norm}). Использование нормализованного ХФСП позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр. Значения нормализованного ХФСП изменяются от 0 до 1.

Для нормализации ХФСП предложено использовать следующую формулу:

$$S_{norm} = (S - 1)/(S + 1).$$

При расчете ХФСП по спутниковой информации MODIS/Terra используются данные зеленого (545–565 нм), красного (620–670 нм) и ближнего ИК (841–876 нм) каналов, а при расчете ХФСП по спутниковой информации Landsat 7 ETM + используются данные зеленого (525–625 нм), красного (630–690 нм) и ближнего ИК (750–900 нм) каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных ранее наземных исследований были получены следующие результаты. Анализ сезонных изменений ХФСП ($\sum S(t)$) (определяемого по значениям СКЯ посевов), величин сухой и сырой биомассы, концентрации хлорофилла ($C_{хл}$) по двумерному критерию случайных величин показал, что между ними имеется достаточно тесная положительная связь (рис. 3). Наиболее высокие коэффициенты корреляции ($R = 0.9–0.95$) наблюдаются между $\sum S(t)$ и $\sum C_{хл}(t)$ за вегетационный период растений посевов, тогда как коэффициенты корреляции между величиной $\sum S(t)$ и сухой и сырой биомассой за сезон исследований составляют $R = 0.75–0.85$ (Sid'ko, 2004). Таким образом, показано, что по величине ХФСП можно судить о потенциальной урожайности посевов. Проведенные расчеты также показали, что между величиной $\sum S(t)$ и урожайностью для одного типа посевов (например, 30 различных сортов пшеницы), независимо от их сортов, условий выращивания и обработки, существует хорошая взаимосвязь. Коэффициенты корреляции были порядка 0.85–0.90. Чем больше параметр $\sum S(t)$ за вегетационный период, тем выше урожайность по зерну на исследуемых участках и полях (Sid'ko, Shevynogov, 2000).

На рис. 4 представлена зависимость урожайности посевов (U) от величины $\sum S(t)$. Для построения данной зависимости использовались обобщенные многолетние результаты по исследуемым культурам (свыше 110 различных вариантов), независимо от условий их посевной и предпосевной обработки, количества внесенных в почву удобрений (N, K, P) на один квадратный метр и сортов культур (пшеница, ячмень и овес), с явно различными сроками (Sid'ko, Shevynogov, 2000).

Далее представлены результаты обработки спутниковых данных среднего пространственно-

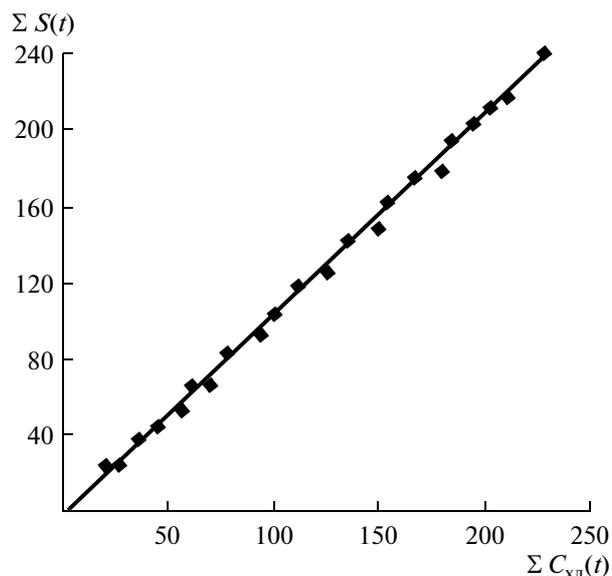


Рис. 3. Взаимосвязь между величинами $\sum S(t)$ и суммарным содержанием хлорофилла $\sum C_{хл}(t)$ в растениях исследуемого посева пшеницы в течение вегетации.

го разрешения (MODIS/Terra) посевов с.-х. культур в течение вегетационного периода (с 14 июня по 7 сентября: с фазы развития всходов до фазы полной спелости (для посевов пшеницы и овса) и конец плодоношения (для посевов гречихи)).

В результате проведенных исследований было установлено, что величина ХФСП может являться индикатором степени засоренности культур. На рис. 5 представлены графики изменений ХФСП и общей фитомассы посевов овса на двух участках. Как видно из представленных графиков, кривые ХФСП посевов значительно отличаются друг от друга. Поскольку обработка почвы, внесение удобрений, сроки сева, орошение были одинаковыми для данных полей, основной причиной отличий посевов является разная степень их засоренности. Посев овса на тестовом участке 6 был более засоренным, чем посев овса на тестовом участке 7 в течение всего вегетационного периода. Таким образом, величина ХФСП может являться индикатором степени засоренности культур.

В таблице представлены значения коэффициентов корреляции ХФСП с массой генеративных органов, вегетативной массой, массой сорных растений и общей фитомассой посевов пшеницы, гречихи и овса. При расчете коэффициентов корреляции использовались данные о величине ХФСП и фитомассы растений с интервалом 10–15 дней. Для оценки степени засоренности агроценозов в таблице представлены данные значений коэффициентов корреляции ХФСП с фитомассой посевов с

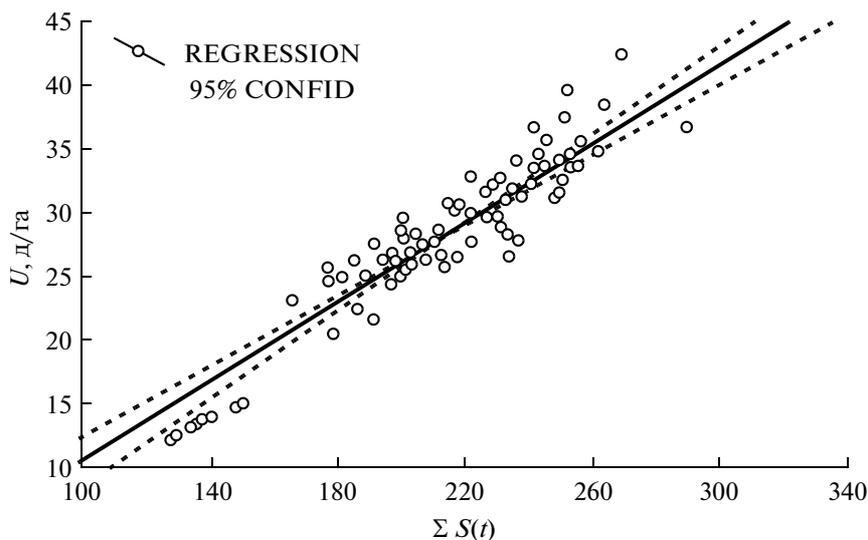


Рис. 4. Зависимость урожайности различных с.-х. посевов от величины хлорофилльного фотосинтетического потенциала.

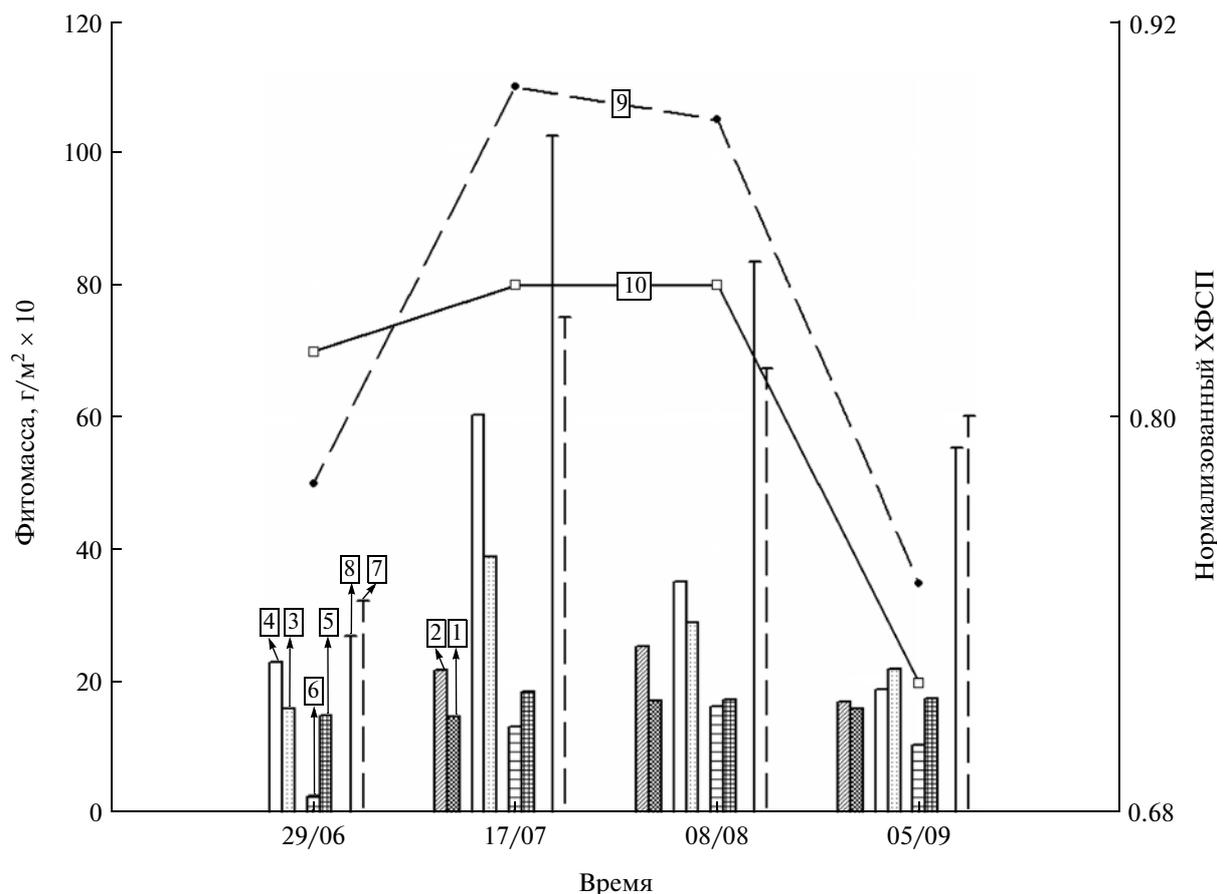


Рис. 5. 1 – Масса генеративных органов (тестовый участок № 6); 2 – масса генеративных органов (тестовый участок № 7); 3 – вегетативная масса (тестовый участок № 6); 4 – вегетативная масса (тестовый участок № 7); 5 – масса сорных растений (тестовый участок № 6); 6 – масса сорных растений (тестовый участок № 7); 7 – общая фитомасса (тестовый участок № 6); 8 – общая фитомасса (тестовый участок № 7); 9 – нормализованный ХФСП (тестовый участок № 6); 10 – нормализованный ХФСП (тестовый участок № 7).

Коэффициенты корреляции ХФСП со значениями фитомассы растений посевов пшеницы, овса, гречихи в течение вегетационного периода 2006 г., $p < 0.05$

Наименование посева, номер тестовой площадки	Коэффициент корреляции между ХФСП и фитомассой			
	генеративных органов	вегетативной	сорных растений	общей
посев пшеницы № 2 “низкая степень засорения” ($n = 9$)	0.87	0.9	0.13	0.68
посев пшеницы № 3 “высокая степень засорения” ($n = 9$)	0.7	0.45	0.75	0.9
посев гречихи № 4 “низкая степень засорения” ($n = 7$)	<i>n/a</i>	0.83	0.05	0.68
посев гречихи № 5 “высокая степень засорения” ($n = 7$)	<i>n/a</i>	0.75	0.44	0.75
посев овса № 7 “низкая степень засорения” ($n = 7$)	0.91	0.71	0.31	0.5
посев овса № 6 “высокая степень засорения” ($n = 7$)	0.2	0.93	0.68	0.77

Примечание. *n/a* – Данные отсутствуют, n – объем выборки.

разной степени засорения. Принято, что если масса сорных растений в посеве превышает 20% от общей фитомассы (принята за 100%), то посев считается более засоренным и отмечен в таблице как “высокая степень засорения”. В случае, если масса сорных растений в посеве менее или равна 20% от общей фитомассы, то посев считается менее засоренным и отмечен как “низкая степень засорения”. В результате обработки спутниковых данных MODIS/Terra было установлено, что значения коэффициентов корреляции между ХФСП и массой сорных растений выше у посевов с высокой степенью засорения. Данная тенденция прослеживается для всех изучаемых видов посевов.

В результате анализа данных таблицы также было установлено, что значения коэффициентов корреляции ХФСП с массой генеративных органов выше 0.87 (для посевов с низкой степенью засоренности), что свидетельствует о высокой степени связи данных параметров. Анализ полученных результатов показал возможность использования ХФСП для оценки потенциальной урожайности посевов как по спутниковой, так и по наземной спектральной информации. И в том, и в другом случае коэффициенты корреляции урожайности с ХФСП посевов с низкой степенью засоренности принимают значения не ниже 0.85.

Далее представлены результаты обработки спутниковых данных с высоким пространственным разрешением (Landsat 7 ETM+), полученные 2 сентября 2006 г. В этот период времени растения

находятся на завершающей стадии развития (полная спелость – посевы пшеницы и овса, конец плодоношения – посевы гречихи).

В ходе проведенных исследований было установлено, что существует возможность разделения исследуемых с.-х. посевов по видовому составу с помощью величины ХФСП. На рис. 6 представлены графики значений отражения посевов пшеницы, гречихи и овса по данным спутника Landsat 7 ETM+. Графики построены по показаниям трех спектральных каналов (2, 3, 4): номер канала указан по оси абсцисс, величина отражения в каждом из каналов – по оси ординат. Полученные на графике точки соединены прямыми линиями. Для облегчения визуального восприятия информации – построения фигуры треугольника – произведено соединение точек ($r_2, b2$) и ($r_4, b4$) сплошной линией (где $b2, b4$ – номер канала, r_2, r_4 – значение отражения в каналах 2 и 4 соответственно). Расчет внутренних углов треугольника α, β, γ (рис. 2) был произведен в системе координат (λ, r) для каждого тестового участка (посевов пшеницы, овса и гречихи). Объем выборки составил 12 тестовых участков для каждого посева (при степени засорения не более 20%). В результате обработки полученных данных было установлено, что, используя значения внутренних углов треугольника, можно разделить изучаемые посевы по видовому составу. Полученные значения углов формируют три непересекающихся подмножества – класса. Каждый образованный класс соответствует отдельной исследуемой культуре. Если учесть также тот

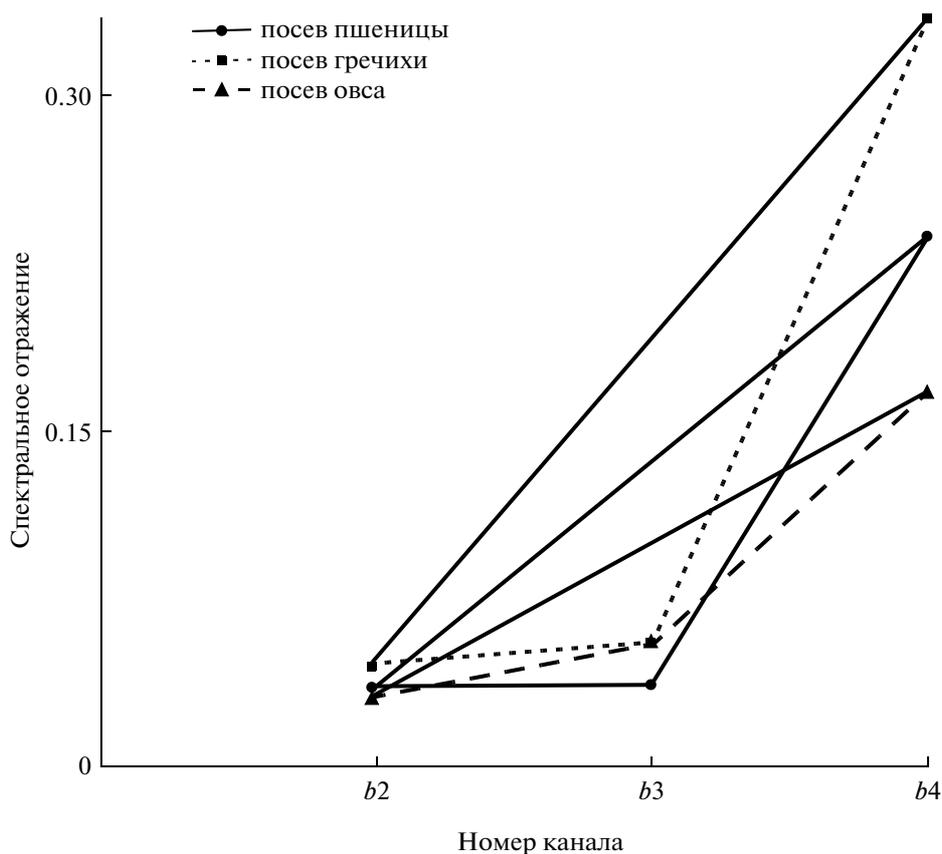


Рис. 6. Графики значений спектрального отражения с.-х. посевов, полученные по данным спутника Landsat 7 ETM+ (используются данные каналов 2, 3, 4).

факт, что по “Теореме о сумме углов треугольника” сумма углов α , β , γ всегда равна 180° , то необходимым и достаточным является знание величин двух любых углов треугольника. Таким образом, показана возможность разделения посевов пшеницы, овса и гречихи (с низкой степенью засорения) по видовому составу между собой с помощью величины хлорофилльного фотосинтетического потенциала посевов.

Также было установлено, что величина ХФСП имеет тесную связь с массой генеративных органов культур. Значения коэффициентов корреляции ХФСП со значениями массы генеративных органов, вегетативной массы, массы сорных растений и общей фитомассы растений посевов пшеницы составили -0.9 ; -0.12 ; -0.6 ; -0.72 соответственно. Расчет ХФСП производился по спутниковой информации Landsat 7 ETM+ для полей, засеянных пшеницей, с разной степенью засорения (20 тестовых участков). Расчет коэффициентов корреляции ХФСП с фитомассой посевов пшеницы показал, что ХФСП имеет тесную связь с массой генеративных органов изучаемых культур. В осенний период времени кривая СКЯ вы-

равнивается (уменьшается площадь S , а, следовательно, значение ХФСП). В результате при увеличении массы генеративных органов значение ХФСП уменьшается.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета хлорофилльного фотосинтетического потенциала с.-х. посевов по спутниковым данным MODIS/Terra и Landsat 7 ETM+.

2. В результате анализа временных рядов значений ХФСП и массы сорных растений посевов с.-х. культур (в период с фазы развития всходы до фазы полная спелость (для посевов пшеницы и овса) и конец плодоношения (для посевов гречихи)) было установлено: величина значений ХФСП (по данным спутниковой информации MODIS/Terra) отражает степень засоренности культур на территории Красноярского края и республики Хакасия (Россия).

3. Установлено, что величина значений ХФСП (по данным Landsat 7 ETM+, полученным 2 сен-

тября 2006 г.) является индикатором урожайности с.-х. культур на исследуемых территориях.

4. Показана возможность разделения посевов пшеницы, овса и гречихи (на завершающей стадии развития: полная спелость — посевы пшеницы и овса, конец плодоношения — посевы гречихи) по видовому составу с помощью величины хлорофилльного фотосинтетического потенциала на основе спутниковой информации Landsat 7 ETM+.

Работа выполнена при поддержке проекта “Разработка методов космического мониторинга лесов Красноярского края с целью оценки динамики биоразнообразия под воздействием естественных и антропогенных факторов”, подпрограмма № 23 “Разнообразие и мониторинг лесных экосистем России”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов с.-х. посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.
- Жукова Е.Ю., Шевырнов А.П., Жукова В.М., Зоркина Т.М., Пугачева И.Ю.* Сезонная динамика продуктивности агроценозов юга Минусинской котловины // Вестн. ТГУ. 2009. № 323. С. 354–357.
- Сидько А.Ф.* Аппаратура высокого разрешения и результаты исследования растительности и водных поверхностей // Очерки экологической биофизики / Под ред. Воловой Т.Г. Новосибирск: Наука, 2003. С. 356–370.
- Сидько А.Ф.* Дистанционный метод определения хлорофилльного фотосинтетического потенциала посевов сельскохозяйственных культур на примере пшеницы, ячменя и овса // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2004. № 5. С. 547–555.
- Сидько А.Ф., Шевырнов А.П.* Спектральная яркость растений, как основа дистанционной диагностики посевов сельскохозяйственных культур // Докл. РАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 120–122.
- Сидько А.Ф., Шевырнов А.П.* Изучение сезонной зависимости спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур от содержания хлорофилла и физиологических параметров растений // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 96–105.
- Султангазин У.М., Муратова Н.Р., Терехов А.Г.* Использование космического мониторинга в планировании и прогнозировании параметров зернового производства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. М.: Полиграф сервис, 2004. С. 291–297.
- Терехов А.Г.* Методика оценки агротехнического уровня возделывания зерновых культур Северного Казахстана и его изменений в период 2000–2009 по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 233–238.
- Шевырнов А.П., Сухинин А.И., Кашкин В.Б., Сидько А.Ф., Высоцкая Г.С.* Научная программа “Зеленая волна” как средство изучения растительности Красноярского края космическими средствами // Сиб. экол. журн. 1996. № 5. С. 363–372.
- Clevers J.G.P.W.* A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data // Rem. Sens. Environ. 1997. V. 61. P. 221–228.
- Erol H., Akdeniz F.* A multispectral classification algorithm for classifying parcels in an agricultural region // Int. J. Rem. Sens. 1996. V. 17. P. 357–3371.
- Foody G.M., Cox D.P.* Sub-pixel land cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions // Int. J. Rem. Sens. 1994. V. 15. P. 619–631.
- Gitelson A.A., Vinã A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J.* Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № 8. L08403. doi: 10.1029/2005GL022688
- Grignetti A., Salvatori R., Casacchia R., Manes F.* Mediterranean vegetation analysis by multitemporal satellite sensor data // Int. J. Rem. Sens. 1997. V. 18. P. 1307–1318.
- Huete A.R.* Separation of soil-plant spectral mixtures by factor analysis // Rem. Sens. Environ. 1986. V. 19. P. 237–251.
- Irish R.* Landsat 7 automatic cloud cover assessment. Algorithms for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery // SPIE. 2000. V. 4049. P. 348–355. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/ACCA_SPIE_paper.pdf
- McDonald R.B., Hall F.G.* Global crop forecasting // Science. 1980. V. 2087. P. 670–679.
- Pax-Lenney M., Woodcock C.E.* The effect of spatial resolution on the ability to monitor the status of agricultural lands // Rem. Sens. Environ. 1997. V. 61. P. 210–220.
- Roberts D.A., Smith M.O., Adams J.B.* Green vegetation, non-photosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data // Rem. Sens. Environ. 1993. V. 44. P. 255–269.
- Seelan S.K., Laguette S., Casady G.M., Seielstad G.A.* Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach // Rem. Sens. Environ. 2003. V. 88. P. 157–169.
- Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G., Sid'ko A., Dunaev K.* Typification of natural seasonal dynamics of vegetation to reveal impact of land surface change on environment (by satellite data) // Adv. Space Res. 2000. V. 26. № 7. P. 1169–1172.
- Sid'ko A.* Remote Assay for Chlorophyll Photosynthetic Potential of Crops on the Example of Wheat // Biol. Bull. RAS. 2004. V. 31. № 5. P. 450–456.
- Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P.* Seasonal dependence of the spectral brightness of agricultural crops on plant chlorophyll content and physiological parameters // Earth Obs. Rem. Sens. 2000. V. 16. P. 487–500.

Determination of Chlorophyll Photosynthetic Potential in Vegetation Using Ground-Based and Satellite Methods

I. Yu. Botvich¹, A. F. Sidko¹, T. I. Pisman^{1,2}, A. P. Shevyrnogov^{1,2}

¹ *Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

² *Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

Potential productivity of agricultural crops can be evaluated using a new method based on chlorophyll photosynthetic potential (CPSP) derived from satellite information. The CPSP is determined by the amount of light absorbed by the plants in the region of the red band of chlorophyll absorption in a definite growth period. The value of parameter CPSP is determined as the area of the triangle whose vertex coordinates are exoatmospheric reflectance in the green, red, and near-infrared bands and the respective mean wavelengths of bands. CPSPs of the crops have been studied by medium and high spatial resolution satellite data (MODIS/Terra and Landsat 7 ETM+). CPSP and crop productivity have been found to be interrelated. The obtained satellite evaluations are in good agreement with the ground-truth observation data.

Keywords: chlorophyll photosynthetic potential; satellite data; agricultural plants