

## Цифровое картографирование урожайности яровой пшеницы на основе вегетационных индексов и оценка её изменений в зависимости от свойств антропогенно-преобразованных почв

Н. В. Гопп<sup>1</sup>, О. А. Савенков<sup>1</sup>, А. В. Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: gopp@issa-siberia.ru*

<sup>2</sup> *Алтайский государственный университет, Барнаул, 656049, Россия*

Проведена сравнительная оценка информативности вегетационных индексов NDVI, EVI, RVI, CTVI, SAVI, MSAVI2 для цифрового картографирования урожайности яровой пшеницы, выращиваемой на юго-востоке Западной Сибири. С использованием полученных линейных моделей построены прогнозные карты урожайности яровой пшеницы, для которых в качестве индикатора и базовой картографической основы послужили данные пространственного распределения вегетационных индексов, рассчитанных по спутниковому снимку Landsat-8 OLI (разрешение 30 м). Сравнительный анализ карт показал, что результаты картографирования урожайности яровой пшеницы на основе вегетационных индексов NDVI, RVI, CTVI, SAVI, MSAVI2 являются идентичными. Результаты с использованием индекса EVI неудовлетворительные, так как на участке с разреженными посевами значения по урожайности были завышены в два раза. Средние значения вегетационных индексов посевов и урожайность яровой пшеницы на агрочернозёме статистически значимо не отличались от соответствующих показателей на агротёмно-серой почве. Установлены заметные и высокие корреляционные зависимости вегетационных индексов и урожайности яровой пшеницы с предпосевной влажностью и содержанием обменного калия, умеренные корреляционные зависимости — с содержанием гумуса. Недостаточная предпосевная влажность почв являлась лимитирующим фактором в формировании урожая яровой пшеницы и не позволила агрохимическим свойствам почв произвести значительный эффект в увеличении урожайности.

**Ключевые слова:** вегетационные индексы, урожайность яровой пшеницы, Landsat-8 OLI, цифровое картографирование, RVI, NDVI, CTVI, EVI, SAVI, MSAVI2, азот, фосфор, гумус, калий, влажность почв

Одобрена к печати: 28.05.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-125-139

### Введение

Оценка изменений пространственно-распределённых оптических и биометрических параметров растительности осуществляется с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в глобальном масштабе с целью получения необходимых знаний о состоянии растительности и её продуктивности, оценки рисков потери урожая от повреждения болезнями и вредителями культур, пожаров и засух. Самыми распространёнными относительными показателями растительности, рассчитываемыми по данным ДЗЗ, являются вегетационные индексы (ВИ) (Толпин и др., 2014; Jackson, Huete, 1991; Silleos et al., 2006). В цифровом картографировании ВИ используются в качестве предикторов пространственно-распределённых биометрических параметров растительности, таких как проективное покрытие, индекс листовой поверхности (Leaf Area Index — LAI), запасы надземной фитомассы, урожайность, влажность. В настоящее время известно около 160 вариантов вегетационных индексов, которые рассчитываются с учётом известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв (Черепанов, Дружинина, 2009). Сильное поглощение солнечного электромагнитного спектра хлорофиллом и каротиноидами в его синей части (0,40–0,47 мкм) и хлорофиллом в красной (0,64–0,68 мкм) приводит к появлению характерных

минимумов в отражательной способности растительности, что связывают с наличием в листьях фотосинтетических пигментов, способных поглощать кванты света. Напротив, сильное отражение электромагнитного спектра в ближней инфракрасной зоне (0,75–1,3 мкм) приводит к появлению характерных максимумов в отражательной способности растительности, что связано с клеточными структурами листа (Дейвис и др., 1983). Таким образом, более высокие значения вегетационных индексов будут характерны для растительности с большим проективным покрытием или запасами надземной фитомассы. Согласно исследованиям (Гопп, 2009, 2013), необходимо учитывать, что наблюдается слабая селективность спектрального отклика в красной и инфракрасной зонах спектра при изучении и сравнении вегетационных индексов различных растительных сообществ. Этот факт нужно принимать во внимание при разработке алгоритмов для классификации спутниковых снимков, позволяющих осуществлять автоматизированное построение цифровых карт биометрических параметров растительности на основе ВИ.

В настоящее время в мировой практике вегетационные индексы делятся на две группы: угловые (slope-based vegetation indices) и дистантные (distance-based vegetation indices) (Jackson, Huete, 1991; Silleos et al., 2006). В табл. 1 представлено краткое описание наиболее распространённых вегетационных индексов, которые используются в исследованиях. Из таблицы видно, что при расчёте ВИ берутся данные преимущественно из двух зон отражённого спектра (красного и инфракрасного). Угловые ВИ отличаются от дистантных тем, что при их расчёте не используются коэффициенты, характеризующие угол наклона почвенной линии (slope of the soil line) и пересечение с ней (intercept of the soil line). Согласно исследованиям (Ahmadian et al., 2016; Kauth, Thomas, 1976), описанные выше коэффициенты рассчитываются на основе анализа графика распределения отражения в красной и инфракрасной зонах спектра (метод Tasseled Cap), а также с помощью портативных и лабораторных спектрофотометров.

Дистантные ВИ применяются для изучения биометрических параметров разреженного растительного покрова, поэтому необходима корректировка вегетационных индексов с использованием почвенных коэффициентов. Расчёт дистантных ВИ сопровождается большей трудоёмкостью и необходимостью использования дополнительного оборудования. В связи с этим в результатах исследования настоящей работы будет обсуждаться только вегетационный индекс MSAVI2, который рассчитывается на основе циклической формулы без использования почвенных корректирующих коэффициентов, что выгодно отличает его от остальных дистантных ВИ.

Прогнозные оценки урожайности сельскохозяйственных культур представляют большую ценность как в научном, так и практическом плане, так как позволяют заблаговременно планировать мероприятия по выявлению и устранению факторов, приводящих к снижению урожайности. Существуют различные прогнозные модели, которые строятся на основе: 1) исторических статистических данных об урожайности, разновременной спутниковой съёмки и метеоданных (Антонов, Сладких, 2009; Евтюшкин и др., 2010; Спивак и др., 2015); 2) установления года аналога по соответствующей динамике вегетационного индекса (Савин и др., 2010); 3) построения регрессионных моделей зависимости между количественными параметрами культур, получаемых при обработке спутниковых данных и в подспутниковых экспериментах (Гопп, 2009, 2013); 4) имитационного моделирования развития посевов (Ничипорович, 1963; Palosuo et al., 2011).

Цифровые карты урожайности сельскохозяйственных культур используются для решения научных и практических задач. Например, при привлечении лабораторно-аналитических данных о химическом составе почв можно выяснить причины неравномерной урожайности (Гопп и др., 2017; Gopp, Savenkov, 2019).

Целью исследования являлось проведение сравнительной оценки информативности вегетационных индексов (NDVI, EVI, RVI, CTVI, SAVI, MSAVI2) для прогнозного картографирования урожайности яровой пшеницы, а также средних значений вегетационных индексов и урожайности яровой пшеницы, произрастающей на различных типах почв (агрочернозёмах и агротёмно-серых).

Таблица 1. Разновидности вегетационных индексов

Название на русском и английском языках	Формулы расчёта	Литературные источники
Угловые вегетационные индексы (slope-based vegetation indices)		
Относительный вегетационный индекс (Ratio Vegetation Index, RVI)	$RVI = \frac{R}{NIR}$	(Richardson, Wiegand, 1977)
Нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	(Kriegler et al., 1969; Rouse et al., 1974)
Трансформированный вегетационный индекс (Transformed Vegetation Index, TVI)	$TVI = \sqrt{\frac{(NIR - R)}{NIR + R}} + 0,5$	(Deering et al., 1975; Perry, Lautenschlager, 1984; Rouse et al., 1974)
Скорректированный трансформированный вегетационный индекс (Corrected Transformed Vegetation Index, CTVI)	$CTVI = \frac{(NDVI + 0,5)}{ NDVI + 0,5 } \sqrt{ (NDVI + 0,5) }$	(Perry, Lautenschlager, 1984)
Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI)	$EVI = G \frac{NIR - R}{NIR + C_1 R - C_2 B + L} (1 + L)$	(Huete et al., 2002; Rouse et al., 1973; Tucker, 1979)
	$EVI_{Landsat} = 2,5 \frac{NIR - R}{NIR + 6R - 7,5B + 1}$	(Landsat..., 2017)
Почвенный вегетационный индекс (Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI)	$SAVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} (1 + L)$	(Huete, 1988)
Дистантные вегетационные индексы (distance-based vegetation indices)		
Разностный вегетационный индекс (Difference Vegetation Index, DVI)	$DVI = aNIR - R$	(Richardson, Wiegand, 1977)
Перпендикулярный вегетационный индекс (Perpendicular Vegetation Index, PVI)	$PVI = \frac{(bNIR - R) + a}{\sqrt{b^2 + 1}}$	(Perry, Lautenschlager, 1984)
Трансформированный почвенный вегетационный индекс (Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index, TSAVI2)	$TSAVI2 = \frac{[a(NIR - aR - b)]}{[R + aNIR - ab + 0,08(1 + a^2)]}$	(Baret, Guyot, 1991)
Модифицированный почвенный вегетационный индекс (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index, MSAVI2)	$MSAVI2 = \frac{2pNIR + 1 - \sqrt{(2pNIR + 1)^2 - 8(pNIR - pR)}}{2}$	(Qi et al., 1994)

Примечание: NIR или  $pNIR$  — значения отражательной способности в ближнем инфракрасном диапазоне спектра (0,85–0,88 мкм); R или  $Pr$  — значения отражательной способности в красном диапазоне спектра (0,64–0,67 мкм); B — значения отражательной способности в синем диапазоне спектра (0,450–0,515 мкм); L — поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы (soil adjustment factor);  $C_1$  и  $C_2$  — константы, корректирующие значения отражательной способности в красном и синем диапазоне спектра; G — усиливающий коэффициент (gain factor); a — угол наклона почвенной линии (slope of the soil line); b — пересечение с почвенной линией (intercept of the soil line). Обозначения только для PVI1 из источника (Perry, Lautenschlager, 1984): a — пересечение с почвенной линией (intercept of the soil line); b — угол наклона почвенной линии (slope of the soil line).

## Объекты и методы исследований

Исследование проводили в 2015 г. на территории Предсалаирской дренированной равнины (с. Елбаш, Искитимский район, Новосибирская обл.). Согласно А. Д. Орлову (1983), территория Предсалаирья представлена денудационно-аккумулятивным типом рельефа, характеризующимся большой глубиной вреза рек и балок (75–100 м) и существенной протяжённостью склонов.

Обследованный участок пашни площадью 112 га находится в пределах водосборных бассейнов рек Малый Елбаш и Сориха (рис. 1).

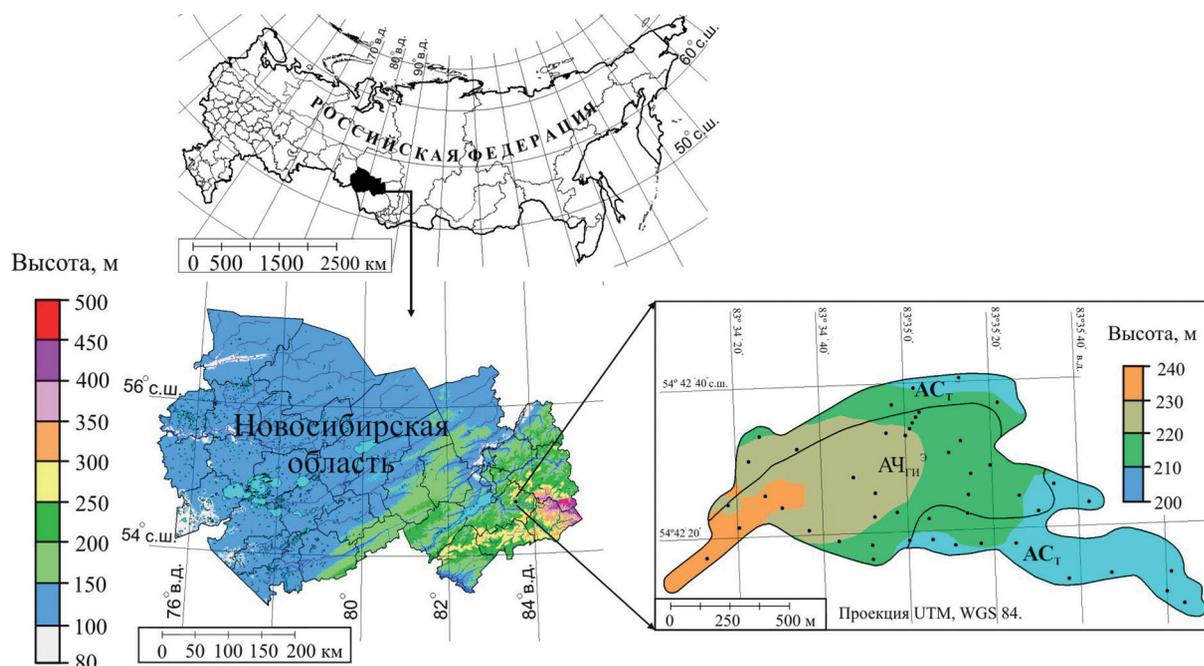


Рис. 1. Карта территории исследования и схема отбора (показана точками) растительных и почвенных проб. Сплошной линией обозначены контуры почв, расположенные на разных гипсометрических уровнях. АЧ<sub>ГИ</sub> — агрочернозём глинисто-иллювиальный элювирированный; АС<sub>Т</sub> — агротёмно-серая почва

Почва водораздельной территории и склонов южной экспозиции имеет формулу профиля PU-AUel-VI-BCsa-Csa и согласно классификации почв России (Классификация..., 2004; Полевой..., 2008) относится к агрочернозёму глинисто-иллювиальному элювирированному, а по международной классификации WRB (IUSS..., 2014) — к Luvic Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic). Почва на эрозионно-опасных склонах различной экспозиции имеет формулу профиля PU-AUel-BEL-BT-C и согласно классификации почв России (Классификация..., 2004; Полевой..., 2008) относится к агротёмно-серой, а по международной классификации WRB (IUSS..., 2014) — к Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric). В мае на момент отбора почвенных образцов проводилась обработка почвы дисковой борной. Координаты точек опробования определяли с помощью системы геопозиционирования (GPS, Garmin eTrex Vista), погрешность привязки — 5 м. Отбор индивидуальных почвенных проб ( $n = 50$ ) проводили по нерегулярной сетке (см. рис. 1) из пахотного горизонта (0–30 см). Пробы почв проанализированы: на содержание гумуса — мокрым сжиганием по Тюрину, нитратного азота — по Карпинскому–Замятиной (экстрагент 0,03 М  $K_2SO_4$ ), подвижного фосфора — по Чирикову (экстрагент 0,5 М  $CH_3COOH$ ), обменного калия — по Масловой (экстрагент 1 М  $CH_3COONH_4$ ) (Агрохимические..., 1975). Определение урожайности яровой пшеницы сорта Новосибирская-15 проводили в сентябре в двукратной повторности методом укосов с учётной площади 0,25 м<sup>2</sup>.

Вегетационные индексы NDVI, EVI, RVI, CTVI, SAVI и MSAVI2 посевов яровой пшеницы рассчитывали по многозональному снимку Landsat-8 OLI (разрешение 30 м, снимок от 25.06.2015). При вычислении SAVI использовали поправочный коэффициент  $L = 0,5$ . Расчёт вегетационных индексов и цифровых карт урожайности яровой пшеницы проводили в программном обеспечении SAGA GIS (Conrad et al., 2015). Для большей выразительности карт выполнено сглаживание пикселей с применением опции Aliasing Pixels. Составление карт урожайности яровой пшеницы проводили с использованием регрессионных моделей. Гипотезу об отсутствии гетероскедастичности проверяли с помощью теста Голдфелда–Квандта и  $F$ -критерия Фишера.

Оценку значимости отличий средних между показателями растительности и свойствами различных почв проводили с использованием следующих критериев: для нормально распределённых данных —  $t$ -критерия Стьюдента; для ненормально распределённых данных —  $U$ -критерия Манна – Уитни.

## Результаты и обсуждение

Прежде чем перейти к описанию результатов исследования, следует отметить, что изучаемые посевы яровой пшеницы были неоднородными по густоте и на поле встречались участки с сильно разреженным растительным покровом, появление которых было обусловлено разными причинами (вредители сельскохозяйственных культур, неравномерная всхожесть семян). В связи с этой особенностью посевов для сравнительной оценки рассчитали угловые и дистантные вегетационные индексы, которые применяются для изучения растительного покрова с различной степенью густоты.

Сравнительный анализ карт вегетационных индексов, рассчитанных в период летнего максимума (25.06.2015), показал, что их значения могут варьировать в различном диапазоне (рис. 2, см. с. 130). Некоторые индексы (EVI, RVI, CTVI) отличаются более широким интервалом варьирования, поэтому модели урожайности, построенные на их основе, возможно, будут обладать худшими прогностическими свойствами. В линейных регрессионных моделях вегетационные индексы объяснили от 76 до 86 % вариаций урожайности яровой пшеницы (рис. 3, см. с. 130).

Модель с NDVI характеризуется лучшими прогностическими свойствами в связи с более высоким коэффициентом детерминации и более низким значением MAPE (табл. 2)

Таблица 2. Показатели качества линейных регрессионных моделей

$r, n = 48$	$r^2$	$F$ -критерий, $p < 10^{-6}$	$t$ -критерий для коэф- фициента регрессии ( $b$ ), $p < 10^{-6}$	Стандартная ошибка оценки уравнения	$t$ -критерий для свободного члена уравнения, $p < 10^{-6}$	MAPE, %
Модель с NDVI, $y = 6,958x - 2,764$						
0,93	0,86	319,29	17,87	1,36	-11,0	3,4
Модель с EVI, $y = 1,878x - 1,284$						
0,89	0,79	181,91	13,49	1,72	5,75	7,49
Модель с RVI, $y = 0,251x + 0,203$						
0,87	0,76	151,89	12,32	1,8	1,63	6,91
Модель с CTVI, $y = 13,707x - 13,343$						
0,92	0,85	279,02	16,7	1,41	14,8	4,44
Модель с SAVI, $y = 4,182x - 2,726$						
0,93	0,86	296,47	17,22	1,37	10,56	4,27
Модель с MSAVI2, $y = 8,951x - 5,686$						
0,92	0,85	277,67	16,66	1,41	12,8	4,5

Примечание: MAPE — средняя абсолютная относительная ошибка;  $y$  — зависимая переменная (прогнозируемая урожайность);  $x$  — независимая переменная (значения вегетационных индексов);  $n$  — число наблюдений;  $p$  — вероятность ошибки.

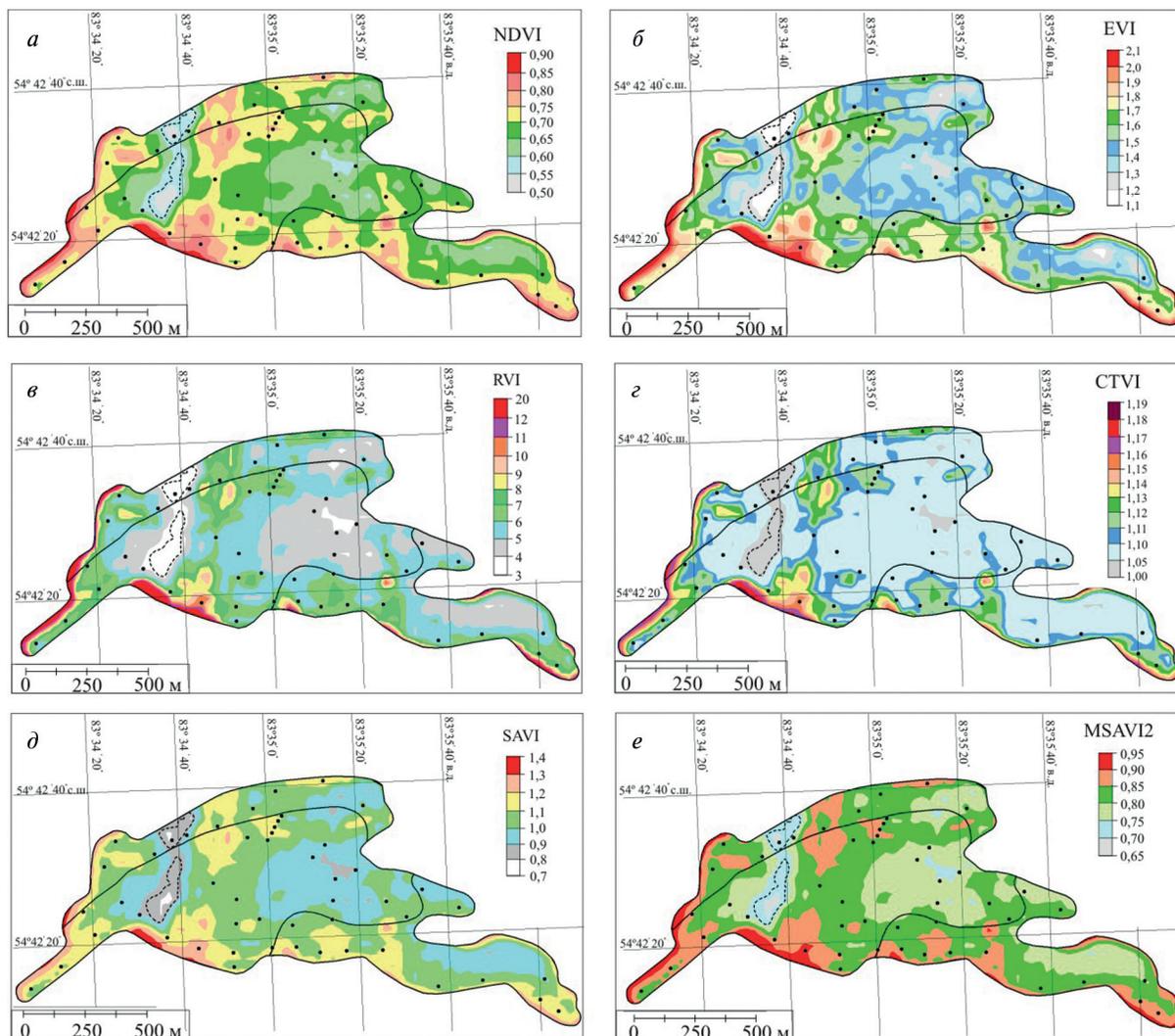


Рис. 2. Карты вегетационных индексов. Сплошной линией обозначены типы почв, пунктирной — ареал разреженных посевов

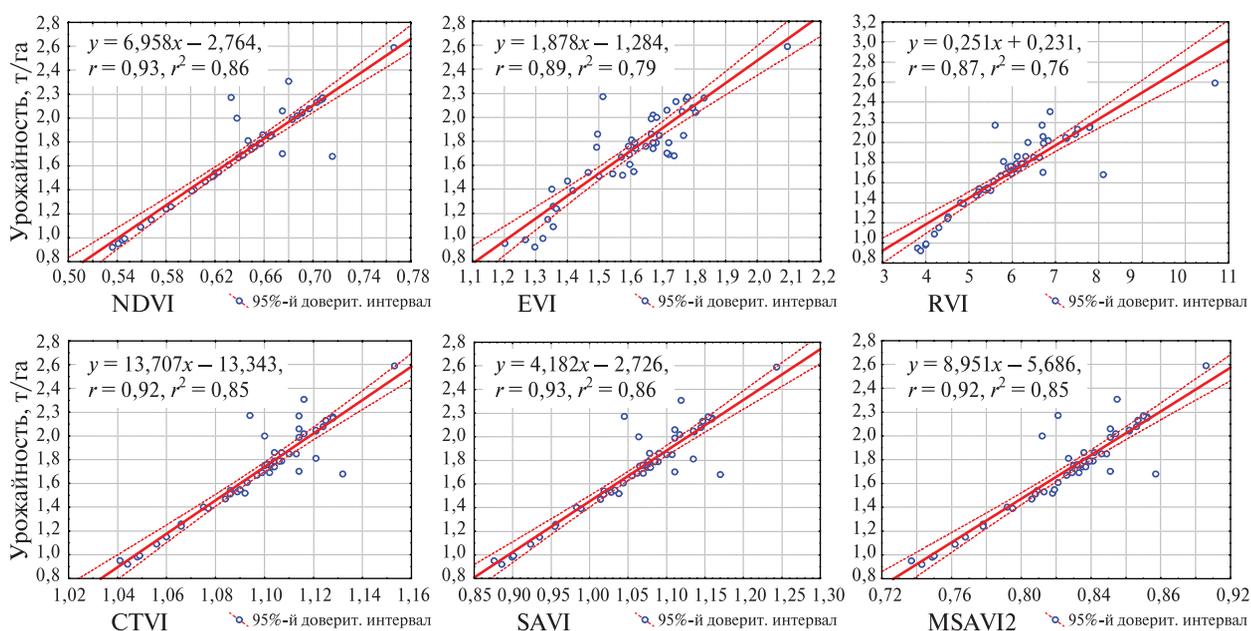


Рис. 3. Зависимость между урожайностью пшеницы и вегетационными индексами

Согласно  $F$ -критерию и его вероятности ( $p$ ), все модели и их коэффициенты детерминации статистически значимы ( $\alpha = 0,05$ ), так как  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$  (4,03). Статистическая значимость коэффициентов регрессии ( $b$ ) подтверждается у всех моделей ( $t$ -критерий больше критического значения 2,009). Статистическая значимость свободного члена уравнения также подтверждается практически у всех моделей, за исключением модели с RVI, у которой свободный член уравнения статистически незначим, поэтому им можно пренебречь (см. табл. 2). Таким образом, все рассмотренные модели достаточно хорошо согласуются с фактически измеренными данными.

Проверка на наличие гетероскедастичности с использованием метода визуального анализа графиков и теста Голдфелда – Квандта показала, что связи между остатками и независимой переменной нет, а расчётные значения  $F$ -критерия меньше критического уровня (рис. 4). Графики распределения остатков свидетельствуют о том, что оно близко к нормальному (рис. 5).

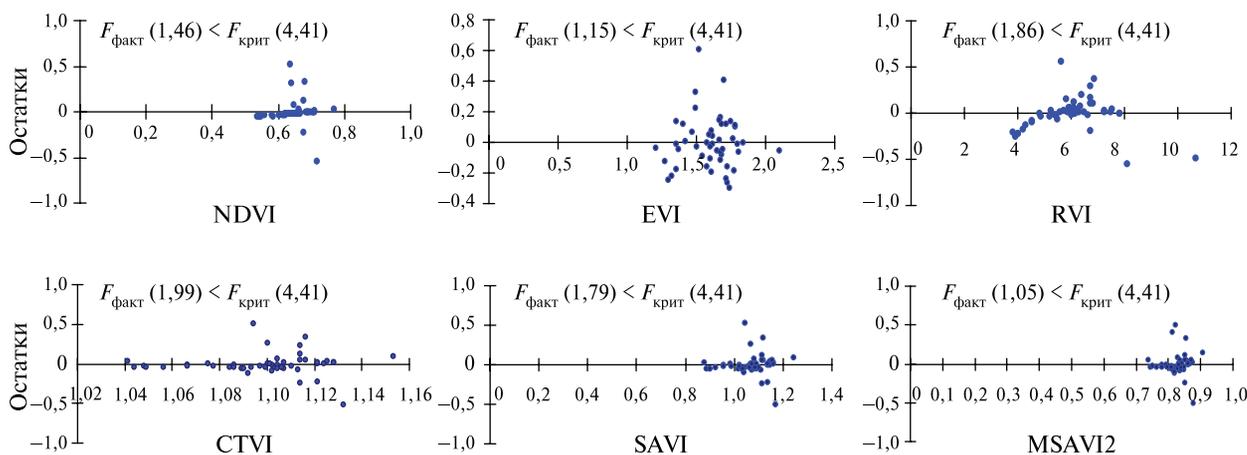


Рис. 4. Графики рассеяния остатков регрессионных линейных моделей

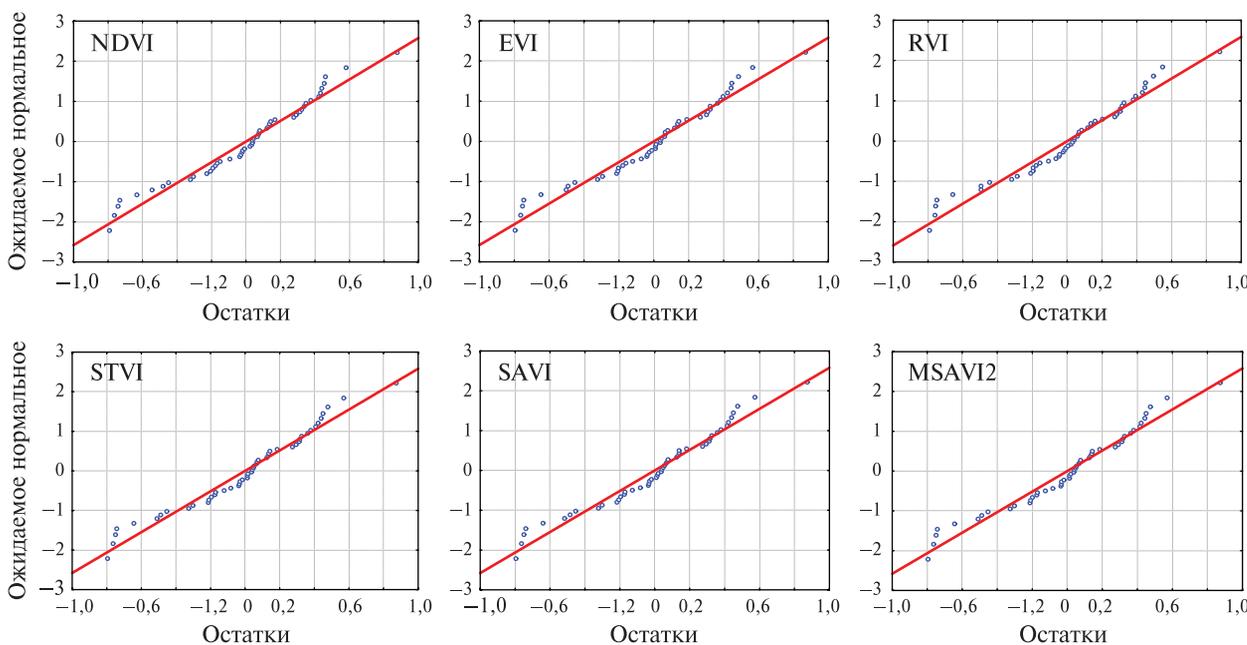


Рис. 5. Нормальные вероятностные графики остатков моделей

Сравнительный визуальный анализ цифровых карт, составленных с помощью полученных моделей, показал, что результаты картографирования урожайности яровой пшеницы с использованием различных индексов практически идентичны (рис. 6). Картографическая модель, составленная на основе вегетационного индекса EVI, демонстрировала в два раза завышенные значения по урожайности на участке с разреженным растительным покровом, следовательно, результаты моделирования и картографирования являются неудовлетворительными (см. рис. 6б). Эталонном для сравнения результатов картографирования урожайности являлся участок на поле, имеющий сильно разреженные посевы пшеницы (выделено пунктиром на карте), где влияние почвы на отражательную способность посевов было значительным.

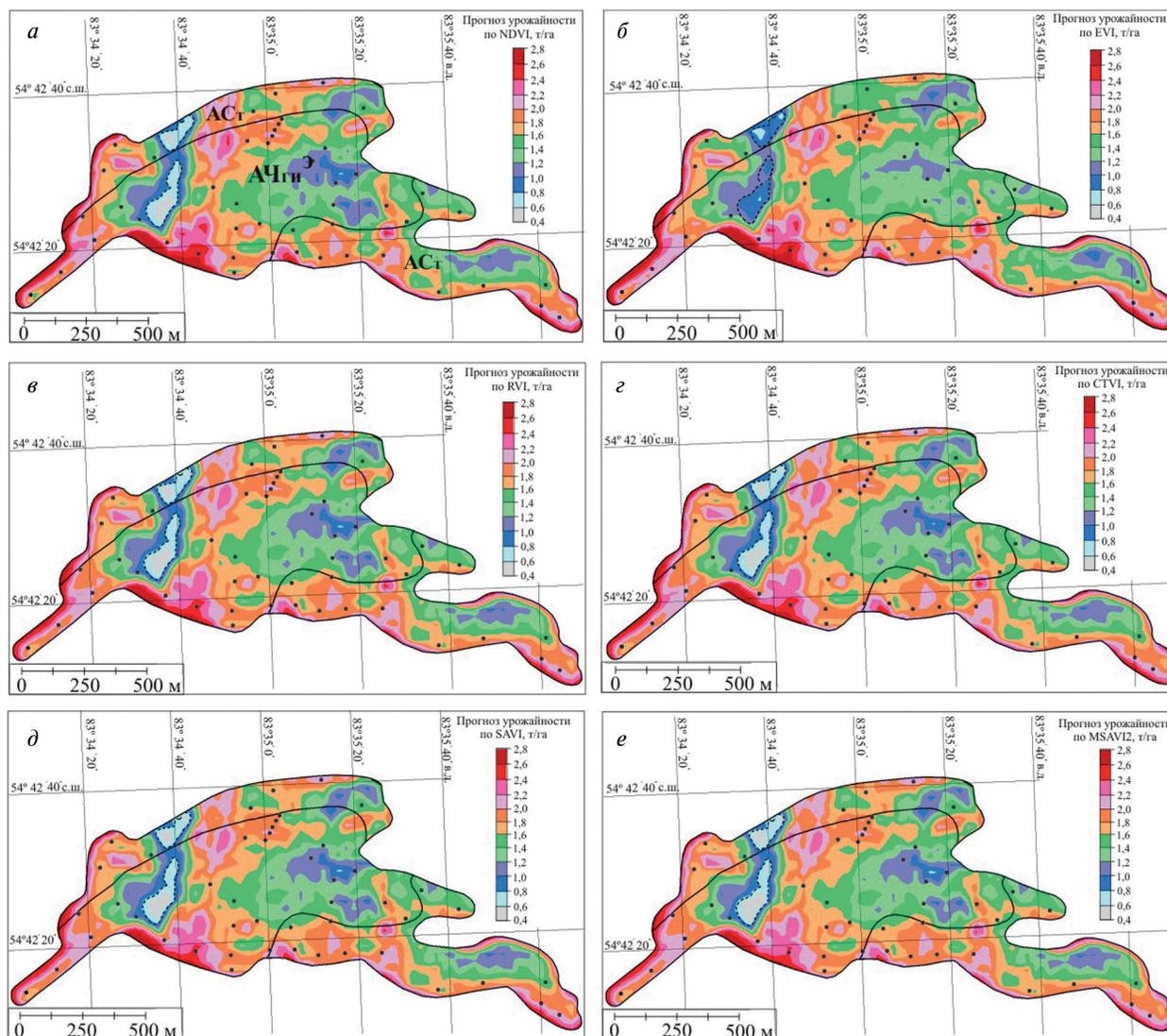


Рис. 6. Карты урожайности яровой пшеницы, составленные с использованием линейных регрессионных моделей и пространственно-распределённых данных вегетационных индексов

Сравнительный анализ агрохимических свойств почв показал, что в агротёмно-серой почве по сравнению с агрочернозёмом содержание гумуса в пахотном горизонте было ниже в 1,2 раза, предпосевной влажности — в 1,1, нитратного азота — в 1,4, подвижного фосфора — в 1,6, обменного калия — в 1,4, что свидетельствует о более высоком потенциальном плодородии агрочернозёма (табл. 3). Однако, несмотря на это, вегетационные индексы посевов и урожайность яровой пшеницы на агрочернозёме статистически значимо не отличались

от соответствующих показателей на агротёмно-серой почве. Наибольшая урожайность яровой пшеницы (2,6 т/га) наблюдалась на более гумусированном и увлажнённом агрочернозёме средней части южного склона, тогда как на менее гумусированных почвах водораздельной территории урожайность была ниже (см. рис. 6).

Таблица 3. Варьирование агрохимических свойств почв, вегетационных индексов и урожайности яровой пшеницы

Показатели	Почвы	
	Агрочернозём ( $n = 25$ )	Агротёмно-серая ( $n = 25$ )
Гумус, %	$4,7 (4,4; 4,3)$ 3,3–7,8	$4,1 \pm 0,95^{**}$ 2,5–5,9
Влажность, %	$23,4 (23,4; 23,8)$ 20,7–29,6	$21,9 \pm 1,8^*$ 16,9–24,8
Азот нитратный, мг N-NO <sub>3</sub> /кг	$5,9 \pm 1,8$ 3,3–10,9	$4,1 \pm 1,0^*$ 2,4–6,4
Подвижный фосфор, мг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /кг	$262; 193; 282$ 111–1176	$164 \pm 40^{**}$ 91–237
Обменный калий, мг K <sub>2</sub> O/кг	$186; 146; 98$ 74–680	$137; 125; 110^{**}$ 62–506
NDVI	$0,642 \pm 0,06$ 0,536–0,766	$0,644 \pm 0,04$ 0,541–0,716
EVI	$1,6 (1,65; 1,7)$ 1,27–2,09	$1,58 \pm 0,15$ 1,20–1,83
RVI	$6,0 (6,1; 6,7)$ 3,88–10,68	$5,97 \pm 1,04$ 3,8–8,1
CTVI	$1,09 \pm 0,03$ 1,04–1,15	$1,09 \pm 0,02$ 1,04–1,13
SAVI	$1,06 \pm 0,09$ 0,89–1,24	$1,06 \pm 0,07$ 0,88–1,17
MSAVI2	$0,83 \pm 0,04$ 0,74–0,91	$0,83 \pm 0,03$ 0,73–0,87
Урожайность, т/га	$1,69 \pm 0,41$ 0,92–2,59	$1,72 \pm 0,32$ 0,95–2,23

Примечания: Над чертой: для нормально распределённых данных — среднее значение и стандартное отклонение ( $\pm s$ ); для ненормально распределённых данных — среднее значение и медиана, мода ( $Me$ ;  $Mo$ ); под чертой — диапазон значений ( $\min$ – $\max$ ). \* Показатели, статистически значимо ( $p < 0,01$ ) отличающиеся от соответствующих величин в агрочернозёме. \*\* Отличия значимы при  $p < 0,05$ .

Согласно данным табл. 4, из всех свойств почв, у которых обнаружена заметная связь с урожайностью пшеницы и NDVI, можно выделить предпосевную влажность и содержание обменного калия. Недостаточная влажность почвы в весенний период очень часто является основным лимитирующим фактором продуктивности сельскохозяйственных культур даже при достаточном обеспечении основными макроэлементами. Недостаток влаги приводит к ухудшению всхожести семян и ускорению развития растений, которое характеризуется сокращением образования новых завязей и быстрым созреванием (формируется короткий колос и щуплое зерно). Корреляционная зависимость между содержанием обменного калия, влажностью и урожайностью пшеницы объясняется участием этого элемента в регулировании водного обмена в растениях. Если влажность почвы достаточная, то калий потребляется растениями в больших количествах (см. табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Спирмена (выделены серым цветом) и Пирсона (без выделения) между свойствами пахотного горизонта почв (0–30 см) и параметрами яровой пшеницы ( $n = 50$ )

Показатель	N-NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Влажность	Гумус	NDVI	EVI	RVI	CTVI	SAVI	MSAVI2	Урожайность
N-NO <sub>3</sub>	–											
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,48	–										
K <sub>2</sub> O	х	х	–									
Влажность	<b>0,60</b>	х	<b>0,56</b>	–								
Гумус	0,36	х	0,33	<b>0,77</b>	–							
NDVI	х	х	<b>0,61</b>	<b>0,57</b>	0,38	–						
EVI	х	х	<b>0,61</b>	0,38	0,37	<b>0,90</b>	–					
RVI	х	х	<b>0,61</b>	0,45	0,33	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	–				
CTVI	х	х	<b>0,57</b>	0,42	0,33	<b>0,97</b>	<b>0,91</b>	<b>0,97</b>	–			
SAVI	х	х	<b>0,58</b>	0,41	0,32	<b>0,98</b>	<b>0,92</b>	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>	–		
MSAVI2	х	х	<b>0,63</b>	0,46	0,36	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	–	
Урожайность	х	х	<b>0,58</b>	<b>0,52</b>	0,35	<b>0,92</b>	<b>0,89</b>	<b>0,87</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>	<b>0,92</b>	–

Примечание:  $n$  — количество почвенных проб; х — корреляция между величинами слабая и не достигает уровня статистической значимости. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, характеризующие заметную и высокую силу связи. Коэффициенты корреляции  $r$  и  $r_s$  со значениями  $>0,35$  представлены с  $p < 0,01$ ; со значениями  $<0,35$  — с  $p < 0,05$ .

Согласно данным табл. 4, между всеми индексами установлены положительные корреляционные зависимости.

Таким образом, результаты исследований показали, что применение вегетационных индексов в качестве косвенных индикаторов урожайности яровой пшеницы и рассчитанные на их основе цифровые карты позволяют оценивать неоднородность урожайности яровой пшеницы в пространстве и сопоставлять её с уровнем содержания важных агрохимических свойств почв.

## Выводы

1. Вегетационные индексы NDVI, EVI, RVI, CTVI, SAVI, MSAVI2 в линейных регрессионных моделях объяснили от 76 до 86 % вариаций урожайности яровой пшеницы. Модель с NDVI характеризовалась лучшими прогностическими свойствами (относительно высокий коэффициент детерминации и низкое значение средней абсолютной относительной ошибки).
2. Карты урожайности яровой пшеницы, составленные с использованием вегетационных индексов NDVI, RVI, CTVI, SAVI, MSAVI2, идентичны. Результаты картографирования с использованием вегетационного индекса EVI неудовлетворительные, так как на участке с разреженными посевами значения по урожайности были завышены в два раза.
3. Полученные в исследовании регрессионные модели некорректно использовать для соседних территорий, разных типов растительности и других сроков спутниковой съёмки, так как они актуальны только для данного обследованного участка. Вегетационные индексы, использованные в качестве косвенных индикаторов урожайности, рассчитанные на их основе цифровые карты позволили оценить неоднородность урожайности яровой пшеницы в пространстве и сопоставить её с уровнем содержания агрохимических свойств почв.
4. В агротёмно-серой почве по сравнению с агрочернозёмом содержание гумуса в пахотном горизонте было ниже в 1,2 раза, предпосевной влажности — в 1,1, нитратного азо-

та — в 1,4, подвижного фосфора — в 1,6, обменного калия — в 1,4, что свидетельствует о более высоком потенциальном плодородии агрочернозёма. Вегетационные индексы посевов и урожайность яровой пшеницы на агрочернозёме статистически значимо не отличались от соответствующих показателей на агротёмно-серой почве.

5. Установлены заметные и высокие корреляционные зависимости вегетационных индексов и урожайности яровой пшеницы с предпосевной влажностью и содержанием обменного калия, умеренные корреляционные зависимости — с содержанием гумуса. Не обнаружены значимые корреляции вегетационных индексов и урожайности яровой пшеницы с содержанием нитратного азота и подвижного фосфора. Недостаточная предпосевная влажность почв являлась лимитирующим фактором в формировании урожая яровой пшеницы и не позволила агрохимическим свойствам почв произвести значительный эффект в увеличении урожайности.

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## Литература

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Антонов В. Н., Сладких Л. А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // Геоматика. 2009. № 4. С. 50–53.
3. Гонн Н. В. Моделирование запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений с использованием наземных и спутниковых данных // Горный информационно-аналит. бюл. 2009. Т. 17. № 12. С. 200–205.
4. Гонн Н. В. Алгоритмический подход при составлении цифровых почвенных карт на основе лабораторно-полевых и спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 58–72.
5. Гонн Н. В., Савенков О. А., Смирнов А. В. Диагностика причин неравномерной урожайности яровой пшеницы // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века: материалы Всерос. науч. конф. Томск: Изд. дом Томского гос. ун-та, 2017. Ч. I. С. 194–199.
6. Евтюшкин А. В., Брыксин В. М., Рычкова Н. В. Оценка состояния растительных покровов по данным дистанционного зондирования и подспутниковых экспериментов // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2010. № 10(72). С. 50–53.
7. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
8. Ничипорович А. А. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах // Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. М.: АН СССР, 1963. С. 5–36.
9. Орлов А. Д. Эрозия и эрозионноопасные земли Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 208 с.
10. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. 182 с.
11. Савин И. Ю., Барталев С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А., Хвостиков С. А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 275–285.
12. Спивак Л. Ф., Витковская И. С., Батырбаева М. Ж., Кауазов А. М. Анализ результатов прогнозирования урожайности яровой пшеницы на основе временных рядов статистических данных и интегральных индексов вегетации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 173–182.
13. Толпин В. А., Лупян Е. А., Барталев С. А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 581–586.
14. Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
15. Ahmadian N., Demattê J. A. M., Xu D., Borg E., Zölitz R. A New Concept of Soil Line Retrieval from Lands // Remote Sensing. 2016. No. 8(9). 738. P. 1–23.
16. Baret E., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // Remote Sensing of Environment. 1991. V. 35. P. 161–173.
17. Conrad O., Bechtel M., Bock M., Dietrich H., Fischer E. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. № 7(8). P. 1991–2007.

18. *Deering D. W., Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A.* Measuring “forage production” of grazing units from LANDSAT MSS data // Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Symp. Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, Michigan, 1975. V. II. P. 1169–1178.
19. *Gopp N. V., Savenkov O. A.* Relationship between the NDVI, yield of spring wheat and properties of the plow horizon of eluviated clay-illuvial chernozems and dark gray soils // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. No. 3. P. 339–347.
20. *Huete A. R.* A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. V. 25. P. 295–309.
21. *Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. Iss. 1–2. P. 195–213.
22. *IUSS Working Group WRB.* World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO. Rome, 2014. 181 p.
23. *Jackson R. D., Huete A. R.* Interpreting vegetation indices // Preventive Veterinary Medicine. 1991. V. 11. Iss. 3–4. P. 185–200.
24. *Kauth R. J., Thomas G. S.* The tasseled Cap — A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT // Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data. Indiana, Purdue University of West Lafayette, 1976. P. 4B-41–4B-51.
25. *Kriegler F. J., Malila W. A., Nalepka R. F., Richardson W.* Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition // Proc. 6<sup>th</sup> Intern. Symp. Remote Sensing of Environment. V. 2. Ann Arbor, Michigan, USA: Environmental Research Institute of Michigan, 1969. P. 97–131.
26. Landsat surface reflectance-derived spectral indices: Product guide. Version 3.6. Geological Survey. Department of the Interior U.S, 2017. 31 p.
27. *Palosuo T., Kersebaum K. C., Angulo C., Hlavinka P., Moriondo M., Olesen J. E., Patil R. H., Ruget F., Rumbaer C., Takáč J., Trnka M., Bindi M., Çaldağ B., Ewert F., Ferrise R., Mirschel W., Şaylan L., Šiška B., Rötter R.* Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models // European J. Agronomy. 2011. V. 35. No. 3. P. 103–114.
28. *Perry C. Jr., Lautenschlager L. F.* Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices // Remote Sensing and the Environment. 1984. V. 14. P. 169–182.
29. *Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian A.* A Modified Soil Adjusted Vegetation Index // Remote Sensing of Environment. 1994. V. 48(2). P. 119–126.
30. *Richardson A. J., Wiegand C. L.* Distinguishing Vegetation From Soil Background Information // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1977. V. 43(12). P. 1541–1552.
31. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Proc. 3<sup>rd</sup> ERTS Symp. Washington, USA, NASA, 1973. V. 1. P. 309–317.
32. *Rouse J. W., Haas Jr. R. H., Deering D. W., Schell J. A., Harlan J. C.* Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt, MD, 1974. 371 p.
33. *Silleos N. G., Alexandridis T. K., Gitas I. Z., Perakis K.* Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years // Geocarto Intern. 2006. V. 21(4). P. 21–28.

## Digital mapping of spring wheat yield based on vegetation indices and estimation of its changes depending on the properties of anthropogenically transformed soils

N. V. Gopp<sup>1</sup>, O. A. Savenkov<sup>1</sup>, A. V. Smirnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia*  
E-mail: gopp@issa-siberia.ru

<sup>2</sup> *Altai State University, Barnaul 656049, Russia*

A comparative estimation of informativeness of vegetation indices NDVI, EVI, RVI, CTVI, SAVI, and MSAVI2 for digital mapping of yield of spring wheat grown in the southeast of Western Siberia is carried out. Using the obtained linear models, forecast maps of spring wheat yield were constructed, for which the data of spatial distribution of vegetation indices calculated by the Landsat-8 OLI satellite image (30 m resolution) had been served as an indicator and basic cartographic ground. Comparative analysis of the maps showed that the results of yield mapping based on vegetation indices NDVI, RVI, CTVI, SAVI, and MSAVI2 were identical. The results of mapping of spring wheat yield with the use of the vegetation index EVI were unsatisfactory, since in the area with sparse crops the values for yield were overstated by 2 times. The spring wheat productivity and vegetation indices were not statistically significantly different for the agro-dark-gray soil and agro-chernozems. The correlations were significant between the spring wheat yield and vegetation indices on the one hand, and pre-sowing water content and the content of exchangeable potassium on the other hand, while for humus the correlations were moderate. Insufficient pre-sowing water content of soils was a restrictive factor in the formation of spring wheat yield and did not allow agrochemical properties of soils to produce an effect in its increasing.

**Keywords:** vegetation indices, yield of spring wheat, Landsat-8 OLI, digital mapping, RVI, NDVI, CTVI, EVI, SAVI, MSAVI2, nitrogen, phosphorus, humus, potassium, pre-sowing water content, moisture

Accepted: 28.05.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-125-139

### References

1. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* (Agrochemical methods of soil investigation), Moscow: Nauka, 1975, 656 p.
2. Antonov V. N., Sladkikh L. A., Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovaniye urozhainosti yarovoi pshenitsy po dannym DZZ (Monitoring the condition of crops and forecasting the yield of spring wheat according to remote sensing data), *Geomatika*, 2009, No. 4, pp. 50–53.
3. Gopp N. V., Modelirovaniye zapasov nadzemnoi fitomassy tundrovyykh soobshchestv rastenii s ispol'zovaniem nazemnykh i sputnikovykh dannykh (Modeling of aboveground phytomass reserves of tundra plant communities using field and satellite data), *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2009, Vol. 17, No. 12, pp. 200–205.
4. Gopp N. V., Algoritmicheskii podkhod pri sostavlenii tsifrovyykh pochvennykh kart na osnove laboratorno-polevykh i sputnikovykh dannykh (Algorithmic approach to digital soil mapping based on laboratory-field and satellite data), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 3, pp. 58–72.
5. Gopp N. V., Savenkov O. A., Smirnov A. V., Diagnostika prichin neravnomernoi urozhainosti yarovoi pshenitsy (Diagnostics of causes of the non-uniform of crop spring wheat), *Pochvennyye resursy Sibiri: vyzovy XXI veka* (Soil resources of Siberia: the challenges of the XXI century), Proc. All-Russia Scientific Conf., 4–8 Dec., 2017, Novosibirsk, Part I, pp. 194–199.
6. Evtushkin A. V., Bryksin V. M., Rychkova N. V., Otsenka sostoyaniya rastitel'nykh pokrovov po dannym distantsionnogo zondirovaniya i podsputnikovykh eksperimentov (Assessment of vegetation cover status according to remote sensing and satellite experiments), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, No. 10(72), pp. 50–53.
7. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils of Russia), Smolensk: Oikomena, 2004, 342 p.

8. Nichiporovich A. A., O putyakh povysheniya produktivnosti fotosinteza rastenii v posevakh (About ways of increase of productivity of photosynthesis of plants in crops), In: *Fotosintez i voprosy produktivnosti rastenii* (Photosynthesis and questions of productivity of plants), Moscow: AN SSSR, 1963, pp. 5–36.
9. Orlov A. D., *Eroziya i erozionnoopasnye zemli Zapadnoi Sibiri* (Erosion and erosion-hazardous lands of Western Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1983, 208 p.
10. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field Guide for Correlation of Russian Soils), Moscow: Pochvennyi institut imeni V. V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.
11. Savin I., Bartalev S., Loupian E., Tolpin V., Khvostikov S., Prognozirovanie urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove sputnikovyykh dannykh: vozmozhnosti i perspektivy (Crop yield forecasting based on satellite data: opportunities and perspectives), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 275–285.
12. Spivak L. F., Vitkovskaya I. S., Batyrbaeva M. Zh., Kauzov A. M., Analiz rezul'tatov prognozirovaniya urozhainosti yarovoi pshenitsy na osnove vremennykh ryadov statisticheskikh dannykh i integral'nykh indeksov vegetatsii (Analysis of spring wheat yield forecasts based on time series of statistical data and integrated vegetation indices), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 173–182.
13. Tolpin V. A., Loupian E. A., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Matveev A. M., Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa "VEGA" (Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the "VEGA" satellite service), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7, pp. 581–586.
14. Cherepanov A. S., Druzhinina E. G., Spektral'nye svoystva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy (Spectral properties of vegetation and vegetation indices), *Geomatika*, 2009, No. 3, pp. 28–32.
15. Ahmadian N., Demattê J. A. M., Xu D., Borg E., Zölitz R., A New Concept of Soil Line Retrieval from Lands, *Remote Sensing*, 2016, No. 8, 738, pp. 1–23.
16. Baret E., Guyot G., Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, 1991, Vol. 35, pp. 161–173.
17. Conrad O., Bechtel M., Bock M., Dietrich H., Fischer E., System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, No. 7(8), pp. 1991–2007.
18. Deering D. W., Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Measuring "forage production" of grazing units from LANDSAT MSS data, *Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, 1975, Vol. II, pp. 1169–1178.
19. Gopp N. V., Savenkov O. A., Relationship between the NDVI, yield of spring wheat and properties of the plow horizon of eluviated clay-illuvial chernozems and dark gray soils, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, pp. 339–347.
20. Huete A. R., A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 1988, Vol. 25, pp. 295–309.
21. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G., Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, Issues 1–2, pp. 195–213.
22. IUSS Working Group WRB, *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, *World Soil Resources Reports No. 106*, FAO, Rome, 2014, 181 p.
23. Jackson R. D., Huete A. R., Interpreting vegetation indices, *Preventive Veterinary Medicine*, 1991, Vol. 11, Issues 3–4, pp. 185–200.
24. Kauth R. J., Thomas G. S., The tasseled Cap — A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT, *Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University of West Lafayette, Indiana, 1976, pp. 4B-41–4B-51.
25. Krieglér F. J., Malila W. A., Nalepka R. F., Richardson W., Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition, *Proc. 6<sup>th</sup> Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*, Vol. II, Ann Arbor, Michigan, USA, Environmental Research Institute of Michigan, 1969, pp. 97–131.
26. *Landsat surface reflectance-derived spectral indices*, *Product guide, Version 3.6*, Geological Survey, Department of the Interior U. S., 2017, 31 p.
27. Palosuo T., Kersebaum K. C., Angulo C., Hlavinka P., Moriondo M., Olesen J. E., Patil R. H., Ruget F., Rumbaer C., Takáč J., Trnka M., Bindi M., Çaldağ B., Ewert F., Ferrise R., Mirschel W., Şaylan L., Šiška B., Rötter R., Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models, *European J. Agronomy*, 2011, Vol. 35, No. 3, pp. 103–114.
28. Perry C. Jr., Lautenschlager L. F., Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices, *Remote Sensing and the Environment*, 1984, Vol. 14, pp. 169–182.

29. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian A., A Modified Soil Adjusted Vegetation Index, *Remote Sensing of Environment*, 1994, Vol. 48(2), pp. 119–126.
30. Richardson A. J., Wiegand C. L., Distinguishing Vegetation from Soil Background Information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, Vol. 43(12), pp. 1541–1552.
31. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proc. 3<sup>rd</sup> ERTS Symp.*, Washington, USA, NASA, 1973, Vol. I, pp. 309–317.
32. Rouse J. W., Haas Jr. R. H., Deering D. W., Schell J. A., Harlan J. C., *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report*, Greenbelt, MD, 1974, 371 p.
33. Silleos N. G., Alexandridis T. K., Gitas I. Z., Perakis K., Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years, *Geocarto Intern.*, 2006, Vol. 21(4), pp. 21–28.