

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ NDVI В ЦИФРОВОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ
СОДЕРЖАНИЯ ФОСФОРА В ПОЧВАХ
И ОЦЕНКА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ИМ РАСТЕНИЙ

© 2019 г. Н. В. Гопп^{1*}, О. А. Савенков¹, Т. В. Нечаева¹, Н. В. Смирнова¹, А. В. Смирнов²

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск

²Алтайский государственный университет, Барнаул

*E-mail: gopp@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 12.10.2018 г.

Разработана методика цифрового картографирования содержания фосфора (общего, органического, подвижного) в почвах с использованием пространственно-распределенных значений NDVI, рассчитанных по снимку Landsat 8 (разрешение 30 м). Проведена сравнительная оценка сильно- и среднегумусированных почв по содержанию фосфора. В среднегумусированных почвах (агрочерноземах, агротемно-серых) по сравнению с сильногумусированными агрочерноземами зафиксировано более низкое содержание общего фосфора в 1.1 раза и органического фосфора в 1.5–1.7 раза. Обратная тенденция установлена для подвижного фосфора: в среднегумусированных почвах его содержание было выше в 2 раза по сравнению с сильногумусированными. Обеспеченность растений фосфором была достаточной, так как его содержание в надземной массе овсяно-гороховой смеси находилось в оптимальном диапазоне от 0.23 до 0.50% на абсолютную сухую массу. Согласно визуальной диагностике внешних признаков дефицита фосфора в растениях не выявлено. Содержание фосфора в растениях, выращенных на среднегумусированных агрочерноземах, было в 1.2 раза ниже, чем на сильногумусированных. Не обнаружено корреляции между запасами надземной фитомассы травосмеси, содержанием фосфора в растениях и NDVI.

Ключевые слова: фосфор, гумус, кальций, магний, цифровое картографирование, запасы надземной фитомассы, овсяно-гороховая смесь, агрочернозем, агротемно-серые, Chernozems, Phaeozems

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019265-73>

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор — один из двадцати наиболее распространенных элементов Вселенной. В различных геосферах (атмосфере, гидросфере, литосфере, педосфере, биосфере) нашей планеты фосфор содержится в органической и минеральных формах (Гинзбург, 1981). Соотношение между этими формами в педосфере зависит от минералогических, физических и химических свойств почвы, а также антропогенных факторов (внесение удобрений, вспашка и др.). Минеральный и органический фосфор служат резервом для подвижных форм элемента. Достаточная обеспеченность почв подвижным фосфором является показателем их окультуренности (Гопп и др., 2018). Несмотря на то, что фосфор накапливается в верхних почвенных горизонтах, происходит ежегодный вынос этого элемента с урожаем выращиваемых культур из пахотных почв, а возврат фосфора с пожнивными остатками, как правило, недостаточен для восполнения потерь. Признаки дефицита фосфора у растений обнаруживаются при его содержании менее 0.15%

на сухую массу, достаточным считается содержание фосфора в диапазоне от 0.20 до 0.75%, чрезмерным или токсичным — более 1% (Handbook..., 1998). Следует отметить, что не только растения могут испытывать недостаток фосфора, но также человек и животные, употребляющие неполноценные продукты питания. В связи с этим изучение содержания фосфора в системе «почва–растение» на пахотных угодьях с преобладанием экстенсивного способа ведения сельского хозяйства представляет научно-практический интерес.

Значительное пространственное варьирование содержания фосфора в почвах обуславливает необходимость разработки методов картографирования и поиска информативных индикаторов, отображаемых на данных дистанционного зондирования Земли. Одним из самых известных индикаторов является вегетационный индекс (NDVI), использование которого позволяет не только картографировать, но и устанавливать закономерности пространственной изменчивости свойств почв (Гопп и др., 2017). В исследованиях (McKenzie, Ryan, 1999; Rivero et al., 2005; Rivero et al., 2009)

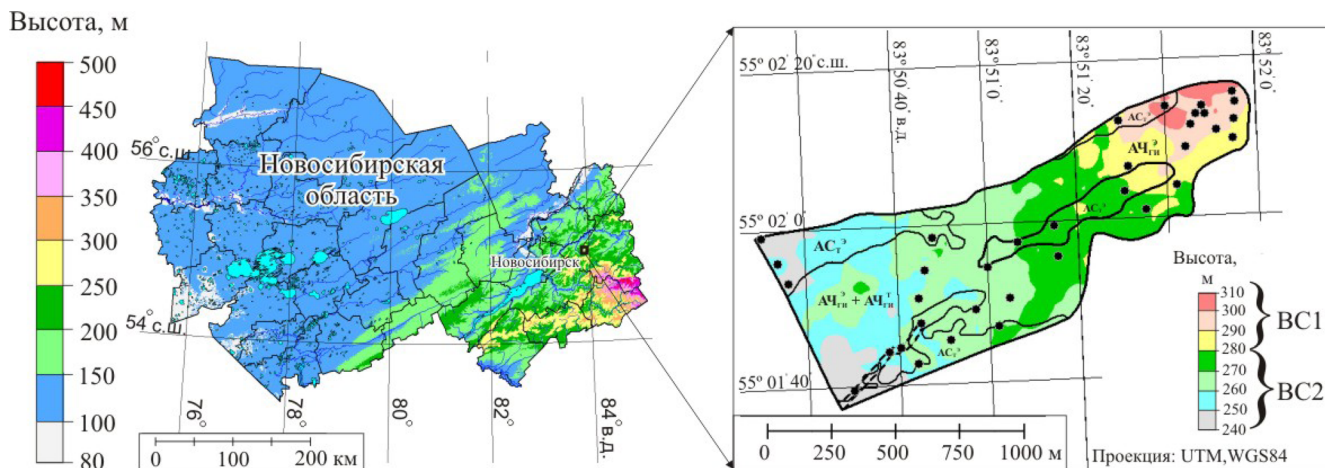


Рис. 1. Карта территории исследования и схема отбора почвенных проб. Условные обозначения: сплошной линией показаны ареалы почв, точками — схема отбора почвенных проб. Склоновые позиции: первая (BC1) и вторая (BC2) высотные ступени, ложбина стока выделена пунктирной линией. Почвы: АЧГТ^э — агрочернозем глинисто-иллювиальный элювирированный; АЧГТ^т — агрочернозем глинисто-иллювиальный темноязыковый; АС_Т — агротемно-серая.

установлено, что NDVI чувствителен к изменениям содержания валового фосфора в почве, что позволяет использовать его в качестве вспомогательной переменной при картографировании содержания данного элемента с применением гибридных геостатистических методов интерполяции. Лин с соавторами (Lin et al., 2015) в экспериментах с полевым спектрофотометром установили, что оптимизация расчета (определение оптимальной длины волны отклика в красном и инфракрасном (ИК) диапазоне) NDVI позволяет улучшить результаты прогнозирования содержания общего и подвижного фосфора. При этом большой вклад в дисперсию изученных параметров оказывают виды выращиваемых культур и такие почвенные свойства как содержание органического вещества и гранулометрический состав. Имеющихся в литературе сведений о связях в системе «почва—растение—NDVI» недостаточно, поэтому исследования в данном направлении в настоящий момент весьма актуальны.

Цель исследований: 1) осуществить прогнозное картографирование содержания фосфора (общего, органического, подвижного) в пахотном горизонте почв с использованием в качестве индикатора значений NDVI, рассчитанных по спутниковому снимку Landsat 8 (разрешение 30 м); 2) провести сравнительную оценку по содержанию фосфора в сильно- и среднегумусированных почвах, расположенных на разных склоновых позициях; 3) оценить корреляционные зависимости между содержанием фосфора в почвах, растениях и значениями NDVI.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование проводили на территории Предсалаирской дренированной равнины юго-востока Западной Сибири (Новосибирская обл., Тогучинский р-н, с. Усть-Каменка), где пахотные почвы склонов в наибольшей степени подвержены эрозии (Хмелев, Танащенко, 2009). Обследованный участок пахотного угодья площадью 100 га и протяженностью 2 км находится в пределах водосборных бассейнов рек Ирба и Хайрузовка (рис. 1).

На обследованной территории распространены следующие типы почв (табл. 1, рис. 1), диагностики которых проводили по классификации почв России (2004).

Для сравнительной характеристики почвы по содержанию гумуса разделены на две группы: сильногумусированные агрочерноземы с содержанием гумуса 5–8% и среднегумусированные (агрочерноземы, агротемно-серые) с содержанием гумуса 3–5%. На первой высотной ступени (280–310 м) расположены преимущественно сильногумусированные почвы, на второй (190–280 м) — среднегумусированные (рис. 1).

Координаты точек опробования определены с помощью системы геопозиционирования (GPS, Garmin eTrex Vista). Отбор индивидуальных почвенных проб ($n = 35$) произведен буром из слоя 0–30 см (пахотный горизонт) по нерегулярной сетке.

Почвенные образцы проанализированы на содержание общего и органического фосфора ($P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{орг}}$) по методу Сэндерса и Вильямса (Soil sampling..., 2008), подвижного фосфора

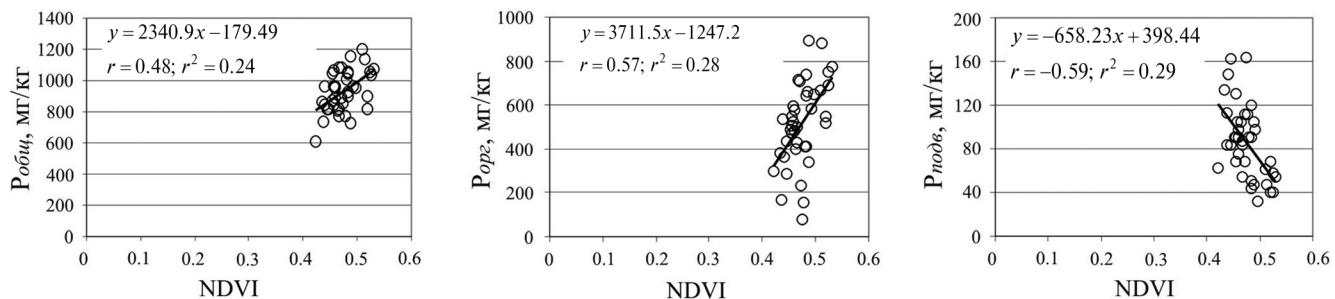


Рис. 2. Регрессионные модели зависимости между содержанием фосфора (общего, органического, подвижного) в почвах и значениями NDVI.

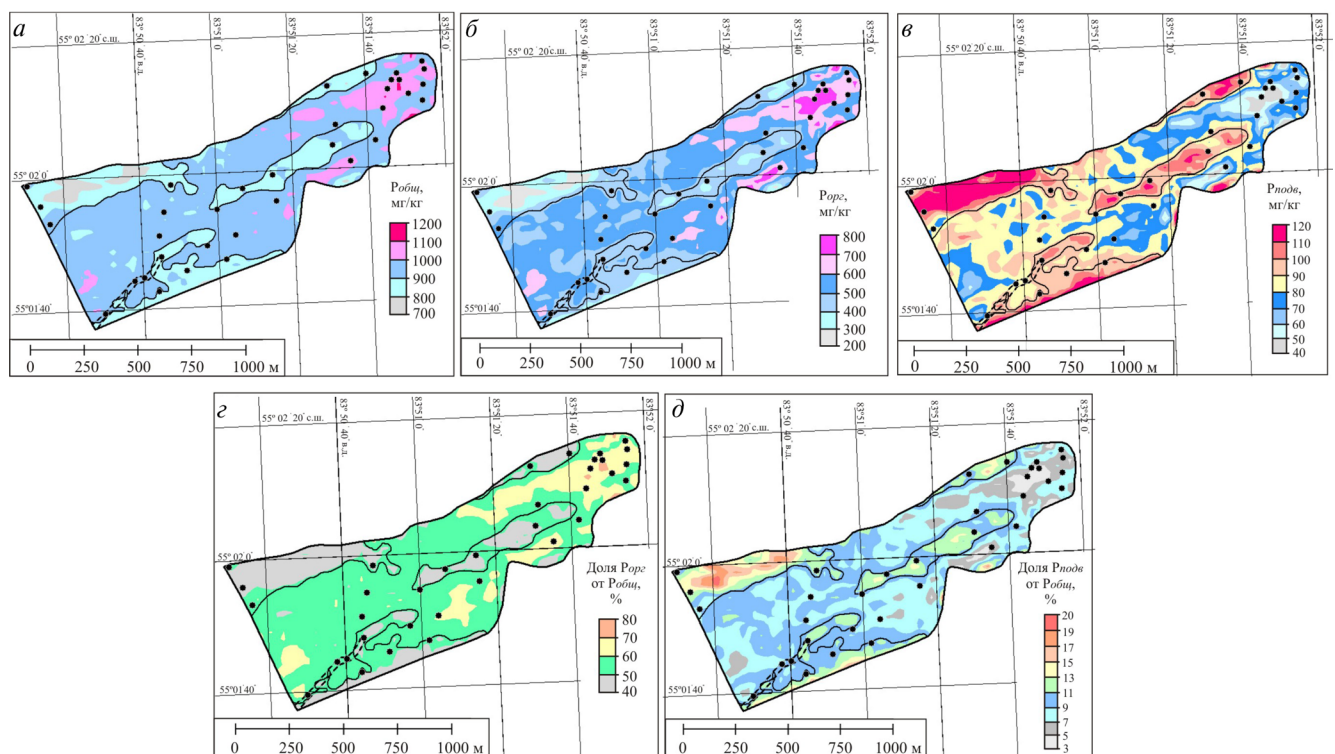


Рис. 3. Прогнозные карты содержания фосфора: а — общего; б — органического; в — подвижного; г — доля органического фосфора от общего; д — доля подвижного фосфора от общего.

($P_{\text{подв}}$) — по Чирикову, гумуса — мокрым озолением по Тюрину, физической глины — по Качинскому, рН водной суспензии ($pH_{\text{вод}}$) — потенциометрическим методом (Практикум..., 2001). Обменные катионы ($Ca^{2+}_{\text{обм}}$ и $Mg^{2+}_{\text{обм}}$) определены методом атомно-абсорбционной спектрометрии при экстрагировании почв ацетатно-аммонийным буферным раствором ($pH = 4.8$). Содержание фосфора в растениях ($P_{\text{раст}}$) определено методом мокрого озоления образцов в смеси серной и хлорной кислот (Практикум..., 2001). Расчет содержания фосфора в почвенных и растительных образцах произведен на элемент (P), для перевода в P_2O_5 необходимо значения умножить на 2.291 (Теория и практика..., 2006).

Запасы надземной фитомассы (ЗНФ) овсяно-гороховой смеси определены методом укусов с учетной площади 0.25 m^2 (с последующим высушиванием и взвешиванием) в тех же точках, где были взяты почвенные пробы.

Прогнозные карты содержания фосфора (общего, подвижного, органического) в почвах составлены с использованием регрессионных моделей. В качестве предиктора использовали NDVI посевов овсяно-гороховой смеси, рассчитанный по многозональному снимку Landsat 8 (разрешение 30 m , снимок от 14.07.2013). Оценка точности регрессионного моделирования проведена с помощью расчета средней абсолютной относительной ошибки MAPE (Mean absolute percentage error) (Афанасьев,

Таблица 1. Почвы исследуемой территории

Название почв по классификации России (2004)	Формула профиля	Название почв по WRB (2014)
Первая высотная ступень (280–310 м)		
Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный насыщенный сильногумусированный тяжелосуглинистый	PU-AUel-BI-BCca-Cca	Luvic Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агротемно-серая насыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая	PU-AUel-BEL-BT-C	Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric)
Вторая высотная ступень (190–280 м)		
Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный насыщенный среднегумусированный тяжелосуглинистый	PU-AUel-BI-BCca-Cca	Luvic Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агрочернозем глинисто-иллювиальный темноязыковатый насыщенный среднегумусированный тяжелосуглинистый	PU-AU-BIyu- BCca-Cca	Haplic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агротемно-серая насыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая	PU-AUel-BEL-BT-C	Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric)

Цыпин, 2008; Гопп и др., 2017). Проверка на наличие автокорреляции остатков (ошибок) моделей выполнена с использованием критерия Дарбина–Уотсона (Дрейпер, Смит, 1986). Оценка нормальности распределения остатков моделей проведена с помощью RS-критерия (Орлова и др., 2005). Оценка значимости различий средних значений параметров почв и растительности проведена с использованием *t*-критерия Стьюдента и *U*-критерия Манна–Уитни для нормально и ненормально распределенных данных соответственно. Оценка типа распределения проведена с помощью критерия Шапиро–Уилка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Установленные зависимости между содержанием фосфора (общего, подвижного, органического) в почвах и NDVI, а также рассчитанные уравнения регрессии (рис. 2) позволили построить карты исследуемых параметров на все обследуемое поле (рис. 3). NDVI объяснил 24, 28 и 29% вариации содержания в почвах общего, органического и подвижного фосфора соответственно (рис. 2). Согласно коэффициентам корреляции ($r = 0.48$; $r = 0.57$), положительная связь между NDVI и содержанием общего и органического фосфора говорит о его большем содержании в сильногумусированных почвах, на которых произрастает овсяно-гороховая смесь с большими значениями NDVI (табл. 2, рис. 2, рис. 3). Обратная

тенденция отмечена для подвижного фосфора, где его отрицательная корреляционная связь с NDVI свидетельствует о большем содержании подвижного фосфора в среднегумусированных почвах, на которых произрастает овсяно-гороховая смесь с меньшими значениями NDVI (табл. 2, рис. 2, рис. 3).

На прогнозных картах (рис. 3 *а–в*) показаны закономерности по изменению содержания общего, органического и подвижного фосфора в почвах вниз по склону. Установлено, что в среднегумусированных почвах (агрочерноземах, агротемно-серых) на BC2 по сравнению с сильногумусированными агрочерноземами на BC1 зафиксировано более низкое содержание общего (в 1.1 раза) и органического фосфора (в 1.5–1.7 раза), а для подвижного фосфора, наоборот, более высокое содержание (в 2 раза) (табл. 2). Так как сильногумусированные почвы содержат больше гумуса и обменных кальция и магния, то значительное снижение содержания подвижного фосфора может быть объяснено его переходом в менее растворимое состояние (включение в состав гумуса и труднорастворимых фосфатов кальция и магния). Отрицательная корреляционная связь содержания подвижного фосфора с гумусом, органическим фосфором и обменными кальцием и магнием подтверждает данное предположение (табл. 3). Доли органического и подвижного фосфора от валового содержания элемента в почвах изменяются в соответствии

Таблица 2. Параметры почв и растительности

Параметры	Виды почв по содержанию гумуса		
	сильногумусированные	среднегумусированные	
	АЧ _{ГИ} ^Э (n = 13)	АЧ _{ГИ} ^Э +АЧ _{ГИ} ^Т (n = 7)	АС _Т (n = 15)
Гумус, %	7.8 ± 1.2	5.0 ± 1.6*	4.5 ± 1.2*
pH _{вод}	5.85 ± 0.15	5.82 ± 0.11	5.68 ± 0.18
Ил, %	16.6; 15.4; 15.4	17.8; 13.5; 12.8	16.2 ± 3.3
Физ. глина, %	50.1 ± 3.3	45.2 ± 2.7*	45.7 ± 3.4*
P _{общ} , мг/кг	1014 ± 121	909 ± 130**	908 ± 94**
P _{орг} , мг/кг	685 ± 123	400 ± 229*	447 ± 126*
P _{подв} , мг/кг	54 ± 15	109 ± 25*	107 ± 28*
Доля P _{орг} от P _{общ} , %	67 ± 7	43 ± 21*	49 ± 11*
Доля P _{подв} от P _{общ} , %	5.0; 3.6; 3.5	12.3 ± 3.9*	13.2; 12.1; 10.5*
Ca ²⁺ _{обм} , смоль/кг	20.8 ± 2.8	16.9 ± 3.7*	16.6 ± 2.7*
Mg ²⁺ _{обм} , смоль/кг	4.14 ± 0.3	2.84 ± 0.3*	2.6 ± 0.5*
P _{раст} , % на абсолютно сухую массу	0.34 ± 0.05	0.29 ± 0.03**	0.31 ± 0.07
ЗНФ, г/м ²	130.5 ± 27.6	155.5 ± 40.3	142.8 ± 30.4
NDVI	0.503 ± 0.02	0.476 ± 0.01**	0.456 ± 0.01*

Примечание. Для нормально распределенных данных указаны среднее значение и стандартное отклонение ($M \pm s$); для ненормально распределенных данных — среднее значение, медиана и мода (M; Me; Mo). * — показатели статистически значимо ($p < 0.01$) отличающиеся от соответствующих в сильногумусированных почвах, ** — отличия значимы при $p < 0.05$. Обозначения почв: см. рис. 1.

с установленными выше закономерностями (табл. 2, рис. 3 з, д).

Необходимо отметить, что согласно разработанным грациям (Кулаковская, 1990), в сильногумусированных почвах содержание подвижного фосфора в почвах было ниже оптимального уровня (<87 мг P/кг) при выращивании зерновых культур, а в среднегумусированных — выше оптимального уровня (>87 мг P/кг). Установленные различия в содержании подвижного фосфора в сильно- и среднегумусированных почвах не оказали значительного влияния на содержание этого элемента в растениях, за исключением среднегумусированных агрочерноземов на которых произрастала овсяно-гороховая смесь с меньшим (в 1.2 раза) содержанием фосфора (табл. 2). Однако этот уровень не является критичным и находится в оптимальном диапазоне. Таким образом, растения даже при содержании подвижного фосфора ниже оптимального уровня могут усваивать и менее доступные формы элемента, входящие, например, в состав гумуса, первичных минералов и труднорастворимых соединений. Растения в зоне контакта корней с почвой извлекают труднодоступные элементы питания с помощью корневых выделений — в основном органических кислот и ферментов (фосфатаза), которые способствуют растворению первичных

минералов и вытеснению из почвенно-поглощающего комплекса ионов и катионов различных элементов. Кроме этого, в течение вегетационного периода в почвах протекают процессы минерализации органического вещества, которые способствуют пополнению пула подвижных форм фосфора доступных для поглощения растениями. Однако следует отметить, что культуры со слаборазвитой корневой системой (морковь, свекла, лук, огурец и др.) характеризуются повышенной чувствительностью к недостатку фосфора, поэтому при выращивании этих растений необходимо предусматривать внесение фосфорных удобрений.

Согласно разработанным грациям (Агрохимические методы..., 1976; Горшкова, 1984; Кидин, 2008; Handbook..., 1998) дефицит фосфора в надземной массе овсяно-гороховой смеси не обнаружен (табл. 2), так как его содержание варьировало в диапазоне, характеризующемся как достаточный (от 0.20 до 0.75% на сухую массу). Не установлены корреляции между запасами надземной фитомассы травосмеси, содержанием фосфора в растениях и значениями NDVI (табл. 3)

Оценка качества регрессионных моделей

Для оценки качества моделей рассчитаны различные показатели (табл. 4).

Согласно F -критерию и его вероятности (p) все модели и их коэффициенты детерминации статистически значимы ($\alpha=0.05$), так как $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ (4.08). Статистическая значимость коэффициентов регрессии (b) у всех моделей подтверждается (t -критерий коэффициентов регрессии больше критического значения 2.02). Значения t -критерия Стьюдента для свободного члена уравнения показывают, что для моделей «Органический фосфор» и «Подвижный фосфор» они больше

критического значения, что свидетельствует об их статистической значимости. Для модели «Общий фосфор» свободный член уравнения статистически незначим, поэтому его не учитывали при расчете карт. Для значения критерия Дарбина-Уотсона (DW) выполняется условие ($1.43 < 1.175$ и $1.54 < 1.75 < 4 - 1.54$), следовательно, автокорреляция остатков отсутствует. Значение RS-критерия попадает в критический интервал (3.83–5.35), поэтому остатки имеют нормальное распределение.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена (выделены серым цветом) между параметрами почв и растительности ($n=35$)

Параметры	$R_{\text{общ}}$	$R_{\text{орг}}$	$R_{\text{подв}}$	$R_{\text{раст}}$	Гумус	$\text{Ca}^{2+}_{\text{обм}}$	$\text{Mg}^{2+}_{\text{обм}}$	Физ. глина	Ил	NDVI	ЗНФ
$R_{\text{общ}}$	—										
$R_{\text{орг}}$	0.78	—									
$R_{\text{подв}}$	<u>-0.33</u>	-0.68	—								
$R_{\text{раст}}$	x	x	x	—							
Гумус	0.77	0.88	-0.75	x	—						
$\text{Ca}^{2+}_{\text{обм}}$	<u>0.44</u>	0.62	-0.65	x	0.74	—					
$\text{Mg}^{2+}_{\text{обм}}$	0.52	0.73	-0.84	x	0.86	0.76	—				
Физ. глина	<u>-0.35</u>	x	-0.62	x	x	x	<u>0.49</u>	—			
Ил	-0.72	<u>-0.37</u>	x	x	<u>-0.38</u>	x	x	0.78	—		
NDVI	<u>0.48</u>	0.57	0.59	x	0.72	0.50	0.71	x	x	—	
ЗНФ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	—

Примечание. ЗНФ — запасы надземной фитомассы. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции заметной и высокой силы связи ($p < 0.01$); подчеркиванием — умеренной силы связи ($p < 0.01$); x — статистически незначимые ($p > 0.05$).

Таблица 4. Показатели качества регрессионных моделей

r , $n = 39$	r^2	F -критерий	t -критерий для коэффициента регрессии (b)	t -критерий для свободного члена уравнения	DW	RS	MAPE, %
Модель «Общий фосфор», $y = 2340.9x - 179.49$							
0.48	0.24	11.7 ($p < 10^{-5}$)	3.43 ($p < 10^{-6}$)	0.55 ($p < 10^{-5}$)	1.56	3.7	30.2
Модель «Органический фосфор», $y = 3711.5x - 1247.2$							
0.57	0.28	14.8 ($p < 10^{-4}$)	3.86 ($p < 10^{-4}$)	2.73 ($p < 10^{-3}$)	1.58	4.7	28.9
Модель «Подвижный фосфор», $y = -658.23x + 398.44$							
0.59	0.29	15.3 ($p < 10^{-3}$)	3.9 ($p < 10^{-3}$)	4.9 ($p < 10^{-3}$)	2.1	4.7	29.7

Примечание. DW — критерий Дарбина-Уотсона (тест на наличие автокорреляции остатков), RS-критерий — тест на нормальность распределения остатков, MAPE — средняя абсолютная относительная ошибка, y — зависимая переменная (прогнозируемое свойство почв), x — независимая переменная (значение NDVI), n — число наблюдений, p — вероятность ошибки.

Значение МАРЕ лежит в интервале от 20 до 50%, что соответствует удовлетворительной точности прогноза. Таким образом, на основании практически всех статистических показателей качества рассматриваемые модели хорошо согласуются с фактически измеренными данными.

Невысокое значение коэффициента детерминации (r^2) не свидетельствует о плохом качестве моделей, оно лишь указывает на наличие существенных факторов, не учтенных в модели, количественные характеристики которых сложно определить по данным Landsat 8. Для объективных выводов относительно функциональной зависимости между NDVI и свойствами почв такие модели не пригодны. Показатель NDVI является косвенным индикатором параметров растительности (обилия надземной фитомассы, содержания хлорофилла и др.) и не может оказывать влияние на содержание различных элементов в почве, то есть не является материальной основой для почв. Однако свойства почв могут оказывать влияние на варьирование параметров растительности и опосредованно на значения NDVI. Поэтому NDVI можно использовать в качестве внешнего индикатора свойств почв при их картографировании.

ВЫВОДЫ

1. Выявлена информативность показателя NDVI посевов овсяно-гороховой смеси для прогнозного картографирования содержания фосфора (общего, органического, подвижного) в пахотном горизонте сильно- и среднегумусированных почв (агрочерноземов, агротемно-серых).

2. В регрессионных моделях показатель NDVI объяснил 24% вариации содержания общего фосфора, 28% — органического фосфора, 29% — подвижного фосфора. На основе полученных регрессионных моделей составлены прогнозные карты свойств пахотного горизонта почв. Оценки точности прогноза содержания фосфора (общего, органического, подвижного) в почвах удовлетворительные (ошибки от 29 до 30%). Полученные в исследовании регрессионные модели некорректно использовать для соседних территорий, разных типов растительности и других сроков спутниковой съемки, так как эти модели актуальны только для данного обследованного участка.

3. В среднегумусированных почвах по сравнению с сильногумусированными зафиксировано более низкое содержание общего (в 1.1 раза) и органического (в 1.5–1.7 раза) фосфора. Обратная тенденция обнаружена для подвижного фосфора: в среднегумусированных почвах его содержание было в 2 раза выше. Содержание подвижного

фосфора в сильногумусированных почвах ниже оптимального уровня (<87 мг/кг), в среднегумусированных, наоборот, выше оптимального уровня. Доля органического фосфора от общего содержания элемента в сильногумусированных почвах была достаточно высокой и составила 64%, в среднегумусированных почвах — 43%. В тоже время доля подвижного фосфора от общего содержания элемента в сильногумусированных почвах составила только 5%, в среднегумусированных — 13%. Установлено, что большое влияние на пространственную изменчивость содержания подвижного и органического фосфора оказывают почвенные свойства, такие как гумус, обменные кальций и магний.

4. Обеспеченность растений фосфором достаточная, так как его содержание в надземной массе овсяно-гороховой смеси находится в оптимальном диапазоне от 0.23 до 0.5% на абсолютно сухую массу. Согласно визуальной диагностике, внешних признаков дефицита фосфора в растениях не выявлено. Содержание фосфора в растениях, выращенных на среднегумусированных агрочерноземах было в 1.2 раза ниже, чем на сильногумусированных. Не обнаружено корреляции между запасами надземной фитомассы травосмеси, содержанием фосфора в растениях и значениями NDVI.

5. Различия по запасам надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси на сильно- и среднегумусированных почвах недостоверны. Корреляционная связь запасов надземной фитомассы с содержанием в почвах фосфора (общего, органического, подвижного) не установлена.

6. Применение NDVI в качестве косвенного индикатора содержания фосфора в пахотном горизонте почв и рассчитанные на его основе модели позволили выявить закономерности пространственной вариабельности изученных свойств почв, сэкономить время, снизить стоимость почвенной съемки и камеральных работ, увеличить информативность карт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агрохимические методы исследования почв* / под ред. Соколова А.В. М.: Наука, 1975. 656 с.
- Афанасьев В.Н., Цыпин А.П.* Эконометрика в пакете STATISTICA: уч. пос. по выполн. лаб. работ. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. 204 с.
- Гинзбург К. Е.* Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 244 с.
- Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В., Смирнов А.В.* Цифровое картографирование

- степени окультуренности пахотных почв Предсалаирской дренированной равнины // Почвы и окружающая среда. 2018. № 1(1). С. 32–44.
- Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В.* Индикационные возможности NDVI для прогнозного картографирования свойств пахотного горизонта почв склоновых позиций на юге Западной Сибири // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1377–1389.
- Горшкова М.А.* Применение методов растительной диагностики на посевах зерновых культур // Оперативная диагностика минерального питания сельскохозяйственных культур / под ред. Л.М. Державина. М.: ЦИНАО, 1984. 144 с.
- Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. Кн. 1. 366 с.
- Кидин В.В.* Основы питания растений и применения удобрений: Уч. пособие. Ч. I. М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008. 415 с.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Кулаковская Т.Н.* Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: ВО «Агропромиздат», 1990. 220 с.
- Орлова И.В., Половников В.А., Габескирия В.Я., Гармаш А.Н., Гусарова О.М., Михайлов В.Н., Пилипенко А.И.* Эконометрика. Методические указания по изучению дисциплины и выполнению контрольной и аудиторной работы на ПЭВМ. М.: Вуз. учебн., 2005. 122 с.
- Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Практикум по агрохимии: Учеб. пос. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
- Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
- Хмелев В.А., Танасиенко А.А.* Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 349 с.
- Handbook of reference methods for plant analysis / Ed. P. Kalra Yash. Boca Raton, Boston, L., NY., Washington: CRC Press, 1998. 287 pp.
- 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 Rep. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
- Lin C., Ma R., Zhu Q., Li J.* Using hyper-spectral indices to detect soil phosphorus concentration for various land use patterns // Environ. Monit. and Asses. 2015. P. 187:4130.
- McKenzie N.J., Ryan P.J.* Spatial prediction of soil properties using environmental correlation // Geoderma. 1999. № 89. P. 67–94.
- Rivero R.G., Grunwald S., Binford M.W., Osborne T.Z.* Integrating spectral indices into prediction models of soil phosphorus in a subtropical wetland // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 113 № 11. P. 2389–2402.
- Rivero R.G., Grunwald S., Newman S., Osborne T.Z. and Reddy K.R.* Incorporation of ASTER Satellite Imagery into Multi-Variate Geostatistical Models To Predict Soil Phosphorus / Biannual Meeting of Commission 1.5 Pedometrics, Division 1 of the International Union of Soil Science (IUSS). Naples, Florida, USA, 2005. P. 75–76.
- Soil Sampling and Methods of Analysis / Ed. M.R. Carter, E.G. Gregorich. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2008. 1224 pp.

Using of NDVI in Digital Mapping of Phosphorus Content in Soils and Assessment of It's Availability by Plants

N. V. Gopp¹, O. A. Savenkov¹, T. V. Nechaeva¹, N. V. Smirnova¹, A. V. Smirnov²

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

²*Altay State University, Barnaul*

It was developed a method of digital mapping of phosphorus content (total, organic, available) in soils using spatially distributed NDVI values calculated from Landsat 8 (30 m resolution). It was carried out comparative analysis of content of phosphorus of soils differing in soil humus content: with high and medium humus content. In medium-humus soils (agrochernozeams, agro-dark-grey) compared to high-humus agrochernozeams discovered lower contents of total phosphorus in 1.1 times, and organic phosphorus in 1.5–1.7 times. The reverse trend was found for available phosphorus — in all medium-humus soils its content was more in 2 times as compared with high-humus agrochernozeams. The provision of plants with phosphorus was sufficient, since its content in the above-ground phytomass of the oat-pea mixture was in the optimal range of 0.23–0.5% for a completely dry mass. According to the visual diagnostics of external signs of phosphorus deficiency in plants was not revealed. It was not found correlation between the content of phosphorus in plants, the reserves of above-ground phytomass of oat-pea mixture and NDVI.

Keywords: phosphorus, soil organic matter, calcium, magnesium, digital mapping, above-ground phytomass, oat-pea mixture, agrochernozeams, agro-dark-gray soils, Chernozeams, Phaeozeams

REFERENCES

- Agrokhimicheskiye metody issledovaniya pochv [Agrochemical methods of soil investigation.] / Pod red. A.V. Sokolova. M.: Nauka, 1975. 656 s. (In Russian).
- Afanas'yev V.N., Tsypin A.P. Ekonometrika v pakete STATISTICA: uch. pos. po vypoln. lab. rabot. [Econometrics in the STATISTICA package] Orenburg: GOU OGU, 2008. 204 s. (In Russian).
- Ginzburg K. Ye. Fosfor osnovnykh tipov pochv SSSR. [Phosphorus of the main soil types of the USSR.] M.: Nauka, 1981. 244 s. (In Russian).
- Gopp N.V., Nechayeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V., Smirnov A.V. Tsifrovoye kartografirovaniye stepeni okulturenosti pakhotnykh pochv Predsalskoy drenirovannoy ravniny [Digital mapping of the degree of domestication of arable soils of the Prestalair drained plain] // Pochvy i okruzhayushchaya sreda. 2018. № 1(1). S. 32–44. (In Russian).
- Gopp N.V., Nechayeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indikatsionnyye vozmozhnosti NDVI dlya prog-noznogo kartografirovaniya svoystv pakhotnogo gorizonta pochv sklonovykh pozitsiy na yuge Zapadnoy Sibiri [indicative capabilities of NDVI for forecasting mapping of the properties of the arable horizon of soils on sloping positions in the south of Western Siberia] // Pochvovedeniye. 2017. № 11. S. 1377–1389.
- Gorshkova M.A. Primeneniye metodov rastitel'noy diagnostiki na posevakh zernovykh kul'tur [Application of methods of plant diagnostics on crops of grain crops] // Operativnaya diagnostika mineral'nogo pitaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur / Pod red. L.M. Derzhavina. M.: TSINAO, 1984. 144 s. (In Russian).
- Dreyper N., Smit G. Prikladnoy regressionnyy analiz. [Applied Regression Analysis.] M.: Finansy i statistika, 1986. Kn. 1. 366 s. (In Russian).
- Handbook of reference methods for plant analysis / Ed. P. Kalra Yash. Boca Raton, Boston, L., NY., Washington: CRC Press, 1998. 287 pp.
- 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 Rep. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
- Khmelev V.A., Tanasiyenko A.A. Zemel'nyye resursy Novosibirskoy oblasti i puti ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya. [Land resources of the Novosibirsk region and ways of their rational use.] Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009. 349 s. (In Russian).
- Kidin V.V. Osnovy pitaniya rasteniy i primeneniya udobreniy: Uch. posobiye. [Basics of plant nutrition and fertilizer use: Uch. allowance.] CH. I. M.: Izd-vo RGAU-MSKHA im. K.A. Timiryazeva, 2008. 415 s. (In Russian).
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii. [Classification and diagnosis of soils of Russia] Smolensk: Oykumena, 2004. 342 s. (In Russian).
- Kulakovskaya T.N. Optimizatsiya agrokhimicheskoy sistemy pochvennogo pitaniya rasteniy. [Optimization of the agrochemical system of soil nutrition of plants.] M.: VO «Agropromizdat», 1990. 220 s. (In Russian).
- Lin C., Ma R., Zhu Q., Li J. Using hyper-spectral indices to detect soil phosphorus concentration for various land use patterns // Environ. Monit. and Asses. 2015. P. 187:4130.
- McKenzie N.J., Ryan P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation // Geoderma. 1999. № 89. P. 67–94.
- Orlova I.V., Polovnikov V.A., Gabeskiriya V.YA., Garmash A.N., Gusarova O.M., Mikhaylov V.N., Pilipenko A.I. Ekonometrika. Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu distsipliny i vypolneniyu kontrol'noy i auditornoy raboty na PEVM. [Guidelines for the study of discipline and the implementation of control and classroom work on a PC.] M.: Vuz. uchebn., 2005. 122 s. (In Russian).
- Polevoy opredelitel' pochv Rossii. [Field determinant of soils of Russia.] M.: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchayeva, 2008. 182 s. (In Russian).
- Praktikum po agrokhimii: Ucheb. pos. 2-ye izd., pererab. i dop. [Workshop on agrochemistry: Proc. pos. 2nd ed., Pererab. and add.] / Pod red. akademika RASKHN V.G. Mineyeva. M.: Izd-vo MGU, 2001. 689 s. (In Russian).
- Rivero R.G., Grunwald S., Binford M.W., Osborne T.Z. Integrating spectral indices into prediction models of soil phosphorus in a subtropical wetland // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 113 № 11. P. 2389–2402.
- Rivero R.G., Grunwald S., Newman S., Osborne T.Z. and Reddy K.R. Incorporation of ASTER Satellite Imagery into Multi-Variate Geostatistical Models To Predict Soil Phosphorus / Biannual Meeting of Commission 1.5 Pedometrics, Division 1 of the International Union of Soil Science (IUSS). Naples, Florida, USA, 2005. P. 75–76.
- Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv [Theory and practice of chemical analysis of soil] / Pod red. L.A. Vorob'yevoy M.: GEOS, 2006. 400 s. (In Russian).
- Soil Sampling and Methods of Analysis / Ed. M.R. Carter, E.G. Gregorich. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2008. 1224 pp.