



ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ ПАХОТНЫХ ПОЧВ ПРЕДСАЛАИРСКОЙ ДРЕНИРОВАННОЙ РАВНИНЫ

© 2018 Н.В. Гопп ¹, Т.В. Нечаева ¹, О.А. Савенков¹, Н.В. Смирнова ¹, В.В. Смирнов²,
А.В. Смирнов³

Адрес: ¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090, Россия, E-mail: natalia.gopp@gmail.com

²ФГБУН Институт вычислительных технологий СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: valentiv.smirnov@gmail.com

³Алтайский государственный университет, проспект Ленина, 61, Барнаул, 656049, Россия. E-mail: sanya.smirnov.fantom@gmail.com

Разработана методология построения цифровых карт степени окультуренности пахотных почв с использованием относительных индексов агрохимических свойств (рН солевого, содержания гумуса, подвижного фосфора, обменного калия). Проведена сравнительная оценка степени окультуренности сильногумусированных почв (агрочерноземов) распространенных на высотах 280-310 м со среднегумусированными (агрочерноземами, агротемно-серыми и агросерыми) на высотах 190-280 м. Степень окультуренности почв средняя, независимо от их гумусированности и типовой принадлежности. Показано, что индексы окультуренности сильно- и среднегумусированных почв характеризуются близкими значениями, что связано с более высоким содержанием подвижного фосфора по Чирикову в менее гумусированных почвах. В среднегумусированных почвах по сравнению с сильногумусированными были выявлены различия в содержании гумуса (ниже в 1.7-2.2 раза), подвижного фосфора по Чирикову и по Николову (в среднем выше в 2.0 и 1.3 раза соответственно), обменного калия (в среднем ниже в 1.2 раза). Установлена положительная корреляционная связь запасов надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси с содержанием в почвах легкоподвижного фосфора по Карпинскому-Замятиной ($r_s=0.41$) и подвижного фосфора по Николову ($r_s=0.33$).

Ключевые слова: гумус, рН, легкоподвижный и подвижный фосфор, обменный калий, запасы надземной фитомассы, агрочернозем, агротемно-серая, агросерая, цифровое картографирование.

Цитирование: 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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из критериев оценки пригодности сельскохозяйственных земель для возделывания культур может служить степень окультуренности почв. Кулаковская Т.Н. (1990) рекомендует использовать обобщенный показатель степень окультуренности, при расчете которого рН солевой, содержание гумуса, подвижного фосфора и обменного калия в почве выражаются в относительных величинах с учетом минимального и оптимального значений этих показателей и потребности возделываемых культур в элементах минерального питания.

Значительное пространственное варьирование агрохимических свойств, особенно на эрозионно опасных склонах (Каштанов, Явтушенко, 1997; Дубовик Е., Дубовик Д., 2013; Якутина и др., 2011; Савич и др., 2015; Гопп и др., 2016а, б), оказывает существенное влияние на такой интегральный показатель, как степень окультуренности почв, что обуславливает необходимость разработки методов цифрового тематического картографирования, как количественных, так и качественных почвенных характеристик. Наличие в хозяйствах цифровых тематических карт позволит определить географическое расположение почвенных ареалов с дефицитом тех или иных элементов питания и оценить пригодность почв для возделывания сельскохозяйственных культур.

Цели исследования: 1 - разработать методологический подход построения цифровых карт относительных индексов агрохимических свойств и степени окультуренности пахотных почв с использованием формул Т.Н. Кулаковской; 2 - сравнить агрохимические свойства сильно- и среднегумусированных почв, их относительные индексы (I_{pH} , $I_{гумус}$, $I_{фосфор}$, $I_{калий}$) и индекс окультуренности; 3 - выявить связь между агрохимическими свойствами почв и запасами надземной фитомассы (ЗНФ) овсяно-гороховой смеси.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на территории Предсалаирской дренированной равнины юго-востока Западной Сибири (Новосибирская обл., Тогучинский район, с. Усть-Каменка), где пахотные почвы склонов в наибольшей степени подвержены эрозии (Танасиенко, 2003; Хмелев, Танасиенко, 2009). Согласно А.Д. Орлову (1983) район исследования представлен денудационно-аккумулятивным типом рельефа, характеризующимся большой глубиной вреза рек и балок (75-100 м) и существенной протяженностью склонов.

Обследованный участок пахотного угодья площадью 225 га и протяженностью 4 км находится в пределах водосборных бассейнов рек Ирба и Хайрузовка (рис.1). Координаты точек опробования определены с помощью системы геопозиционирования (GPS, Garmin eTrex Vista). Отбор индивидуальных почвенных проб ($n=57$) произведен буром из слоя 0-30 см (пахотный горизонт) по нерегулярной сетке. Почвенная съемка проведена в масштабе 1:5000 (Общесоюзная инструкция..., 1973).

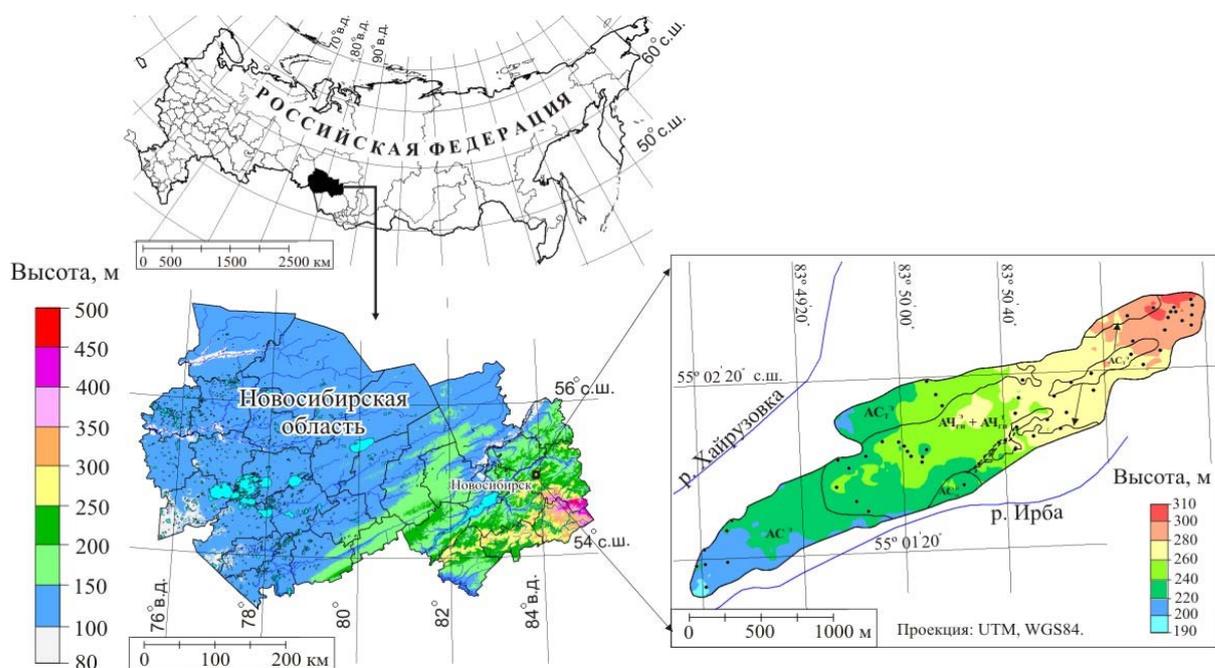


Рисунок 1. Карта территории исследования и схема отбора почвенных проб. Условные обозначения: сплошной линией показаны контуры почв, расположенные на разных гипсометрических уровнях; пунктирной расположено ложбины стока; точками схема отбора почвенных проб. Почвы (тип и подтип): $АЧ_{Ги}^Э + АЧ_{Ги}^Г$ агрочернозем глинисто-иллювиальный элювирированный в сочетании с агрочерноземом глинисто-иллювиальным темноязыковатым; $АС_Т^Э$ агротемно-серая элювирированная; $АС^Э$ агросерая элювирированная; $АС_Т^Б$ агростратозем темногумусовый водно-аккумулятивный на темно-серой элювирированной почве.

Согласно обобщенной классификации Т.В. Звонковой (1970) приводораздельные и придолинные склоны в большей степени покатые (уклон $2-5^0$) и в меньшей степени сильнопокатые (уклон $5-10^0$), что определяет значительную и сильную степень опасности развития эрозии соответственно (рис. 2). По карте направления стока было определено, что расстояние до сброса ливневых и талых вод в русла рек на высотах 280-310 м короче, чем на высотах 190-280 м, следовательно, почвы этой высотной ступени менее подвержены смыву.

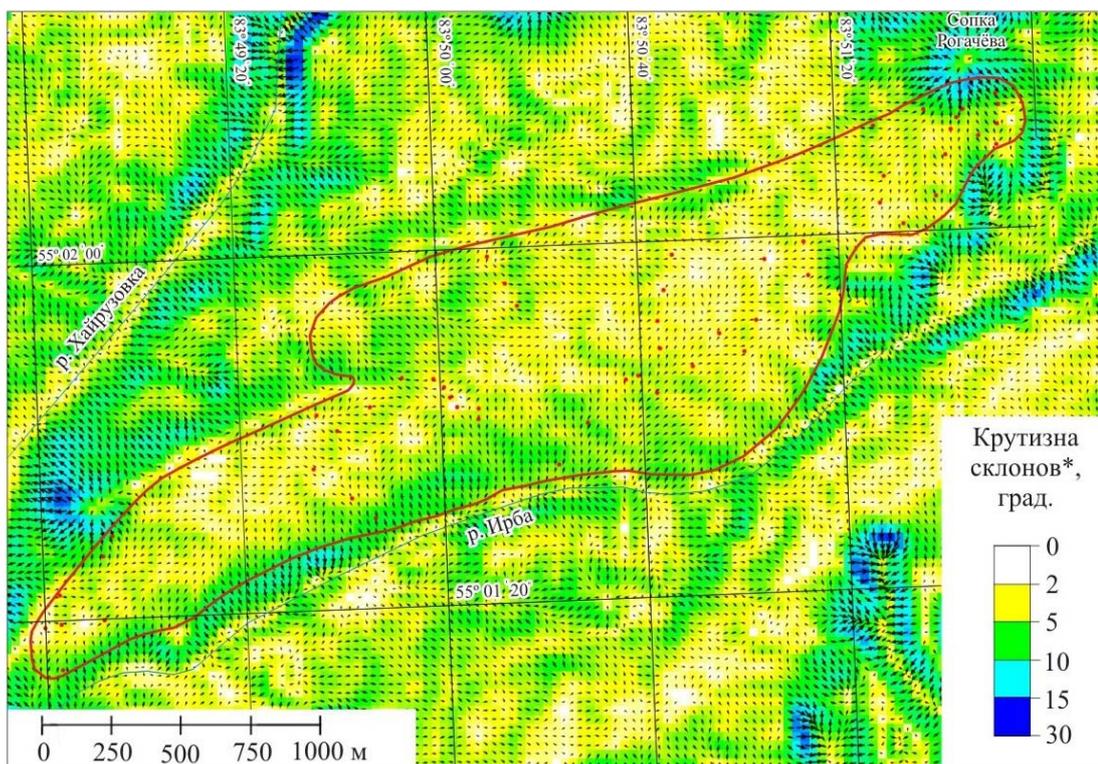


Рисунок 2. Карта крутизны склонов и направления стока (чем длиннее стрелки, тем больше значение крутизны склонов). * карта составлена на основе цифровой модели высот SRTM V3. (разрешение 30 м) с применением ступенчатой неравномерной шкалы.

На обследованной территории распространены следующие типы почв (табл. 1, рис. 1), диагностику которых осуществляли по классификации почв России (2004). Для сравнительной характеристики почвы по содержанию гумуса были разделены на две группы: сильногумусированные (преимущественно агрочерноземы) с содержанием гумуса 5-8 % и среднегумусированные (агрочерноземы, агротемно-серые и агросерые) с содержанием гумуса 3-5%. Сильногумусированные почвы расположены на высотах 280-310 м, среднегумусированные на 190-280 м.

Таблица 1. Почвы исследуемой территории

Название почв по классификации почв России (2004, 2008)	Формула профиля	Название почв по классификации WRB (2014)
Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный насыщенный сильногумусированный тяжелосуглинистый (АЧ _{ГИ} ³)	PU-AUel-BI-BICca-Cca	Luvic Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный насыщенный среднегумусированный тяжелосуглинистый (АЧ _{ГИ} ³)	PU-AUel-BI-BICca-Cca	Luvic Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агрочернозем глинисто-иллювиальный темноязыковатый насыщенный среднегумусированный тяжелосуглинистый (АЧ _{ГИ} ¹)	PU-AU-BIyu-BICca-Cca	Haplic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агротемно-серая элювиированная насыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая (АС _Г ³)	PU-AUel-BEL-BT-C	Luvic Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric)
Агросерая элювиированная ненасыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая (АС ³)	P-AEL-BEL-BT-C	Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric)
Агростратозем темногумусовый водно-аккумулятивный на темно-серой элювиированной почве насыщенный среднегумусированный тяжелосуглинистый (АС _{ЗТ} ^В)	PU-RUaq-[AU-AEL]-BEL-BT-C	Greyzemic Phaeozems Colluvic (Siltic, Taptomollic)

Почвенные образцы проанализированы на содержание гумуса мокрым сжиганием по Тюрину, легкоподвижного фосфора по Карпинскому-Замятиной (экстрагент 0,015 М K₂SO₄), подвижного фосфора по Чирикову (экстрагент 0,5 М CH₃COOH) и по Николову (экстрагент 0,1 М NH₄OOCCH₂CH(OH)COONH₄), обменного калия по Масловой (экстрагент 1 М CH₃COONH₄), pH солевой суспензии потенциометрическим методом (Практикум ..., 2001).

Запасы надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси определены методом укусов с учетной площади 0,25 м² (с последующим высушиванием и взвешиванием) в тех же точках, где были взяты почвенные пробы. Необходимо отметить, что небольшая часть обследованного пахотного угодья была занята ячменем, поэтому объем выборки по ЗНФ овсяно-гороховой смеси n=39 (табл. 2).

Оценка значимости различий средних значений агрохимических параметров 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.

По методике Т.Н. Кулаковской (1990) на первом этапе рассчитывают относительные индексы (I_{отн}) для каждого агрохимического свойства (I_{pH}, I_{гумус}, I_{фосфор}, I_{калий}) почвы по следующей формуле:

$$I_{отн} = \frac{X_{факт} - X_{мин}}{X_{опт} - X_{мин}} \quad (1),$$

где $X_{факт}$ фактическое значение показателя, $X_{мин}$ и $X_{опт}$ минимальное и оптимальное значения показателя для данной почвы.

Автором метода (Кулаковская, 1990) установлены следующие минимальные значения агрохимических показателей: pH_{KCL} 3,5, содержание гумуса 0,5%, подвижного фосфора (P₂O₅) и обменного калия (K₂O) по 2 мг/100 г почвы. За оптимальный уровень содержания гумуса и pH_{KCL} приняты значения свойств лучшей по качеству и урожайности почвы. В Новосибирской области такой почвой (эталон или стандартом) является чернозём выщелоченный (Тюменцев, 1979; Галева, Семендяева, 2012), для которого характерны следующие показатели: pH_{KCL} 6, содержание гумуса 8%. За условно оптимальное содержание подвижного фосфора и обменного калия в почвах лесостепи Западной Сибири при возделывании зерновых культур приняты следующие значения: P₂O₅ 20 мг/100 г (Аверкина, Синешкоков, Ткаченко, 2011), K₂O 30 мг/100 г (Якименко, Нечаева, 2016). Если величина фактического показателя агрохимических свойств выше оптимального значения, то их относительный индекс принимается за 1,0 (Кулаковская, 1990).

На втором этапе, используя рассчитанные I_{отн} для агрохимических свойств, вычисляют индекс окультуренности (I_{ок}) почв по следующей формуле:

$$I_{ок} = \frac{I_{гумус} + I_{pH} + I_{фосфор} + I_{калий}}{4} \quad (2)$$

По I_{ок} выделяют 4 степени окультуренности почв: очень низкая индекс менее 0,4, низкая 0,41-0,60, средняя 0,61-0,80, высокая 0,81-1,00 (Кулаковская, 1990).

Карты относительных индексов агрохимических свойств и индекса окультуренности почв составлены с использованием калькулятора растров (программное обеспечение ENVI), который позволяет производить математические операции с количественными параметрами пикселей геопривязанного растрового изображения в формате GeoTIFF. Значения относительных индексов агрохимических свойств в ячейках растра больше 1 (то есть фактическое содержание выше оптимального) были заменены с помощью разработанной программы ZChanger на новые значения индекса, которые равны единице. Основой для расчета карт относительных индексов агрохимических свойств почв послужили цифровые карты данных свойств, составленные с использованием геостатистических методов интерполяции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе формулы 1 и цифровых карт агрохимических свойств почв построены карты относительных индексов рН солевого, содержания гумуса, подвижного фосфора по Чирикову и обменного калия (рис. 3). Варьирование значений $I_{pH(KCL)}$ и pH_{KCL} в исследованных почвах были незначительными (рис. 3 А, табл. 2). Статистически подтверждено, что в среднегумусированных почвах (агрочерноземах, агротемно-серых и агросерых) происходит уменьшение значений $I_{гумус}$ и содержания гумуса в 1,7-2,2 раза по сравнению с сильногумусированными агрочерноземами (рис. 3 Б, табл. 2, 3). Обратная тенденция отмечена по изменению $I_{фосфор(Чириков)}$ и содержанию подвижного фосфора: в сильногумусированных почвах их значения были в среднем в 2 раза ниже, чем в среднегумусированных (рис. 3 В, табл. 2, 3).

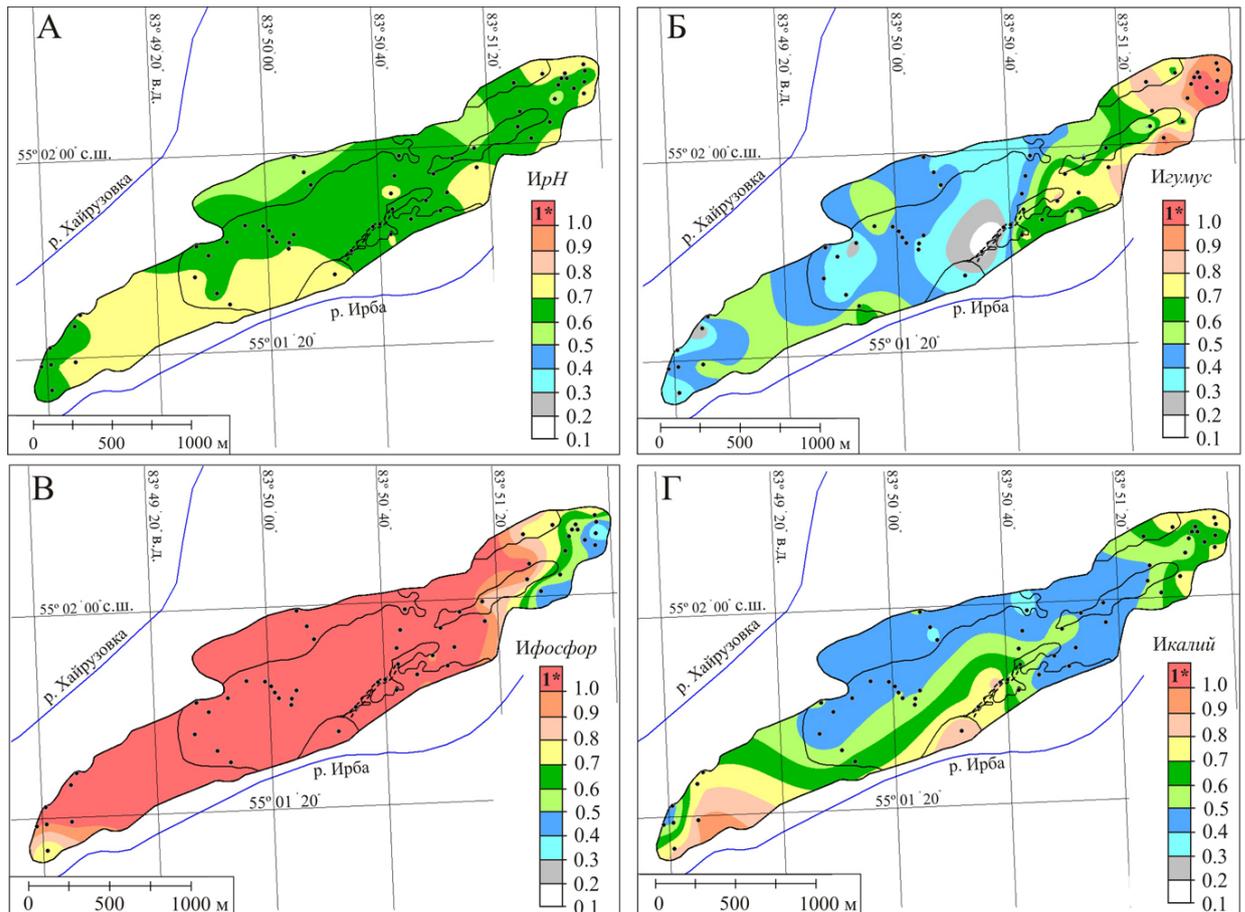


Рисунок 3. Карты относительных индексов рН солевого (А), содержания гумуса (Б), подвижного фосфора по Чирикову (В), обменного калия (Г). 1* фактическое значение выше оптимального. Условные обозначения см. рис.1.

На карте выделяется значительный по площади ареал почв, в которых $I_{фосфор}$ равен 1.0, следовательно, фактическое содержание подвижного фосфора выше оптимального уровня (>20 мг/100 г). Изменение $I_{калий}$ и содержания обменного калия в почвах было неравномерным: в среднегумусированных агрочерноземах и агротемно-серых почвах их значения снижались в 1.2 раза по сравнению с сильногумусированными агрочерноземами, в остальных случаях различия были недостоверны (рис. 3 Г, табл. 2, 3). В целом содержание обменного калия в почвах было ниже оптимального уровня (<30 мг/100 г).

Таблица 2. Почвенные свойства и запасы надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси

Параметры	Виды почв по содержанию гумуса			
	сильногумусированные	среднегумусированные		
	$AЧ_{ГП}^{\ominus}+AЧ_{ГП}^{\Gamma}$ (n = 13)	$AЧ_{ГП}^{\ominus}+AЧ_{ГП}^{\Gamma}$ (n = 17)	$AC_{Г}^{\ominus}$ (n = 15)	AC^{\ominus} (n = 12)
pH _{KCL}	5,2 ± 0,1	5,2 ± 0,1	5,1 ± 0,2	5,2 ± 0,2
Гумус, %	7,8 ± 1,2	4,1 ± 1,6*	4,5 ± 1,2*	3,6 ± 0,9*
K ₂ O по Масловой, мг/100 г	20,2 ± 2,5	16,6 ± 3,1*	17,0 ± 3,1**	18,8 ± 4,7
P ₂ O ₅ по Чирикову, мг/100 г	12,3 ± 3,4	25,4 ± 4,6*	24,6 ± 6,9*	22,9 ± 4,4*
P ₂ O ₅ по Карпинскому-Замятиной, мг/кг	0,31;0,29;0,33	0,54;0,33;0,2	0,43;0,22;0,22	0,37 ± 0,30
P ₂ O ₅ по Николову, мг/100 г	2,7;2,6;2,8	3,3;3,3;2,5*	3,2 ± 1,6	4,1;3,7;6,5*
Запасы надземной фитомассы, г/м ²	130,5 ± 27,6 (n=13)	155,5 ± 40,3 (n=8)	142,8 ± 30,4 (n=14)	143; 154; 155 (n=5)

Примечание. Для нормально распределенных данных представлены среднее значение и стандартное отклонение ($M \pm s$); для ненормально распределенных данных среднее значение, медиана и мода (M ; Me ; Mo); n объем выборки. * показатели статистически значимо ($p < 0,01$) отличающиеся от соответствующих в сильногумусированных агрочерноземах, ** отличия значимы при $p < 0,05$. Обозначения почв см. табл. 1.

Таблица 3. Относительные индексы почвенных свойств и индекс окультуренности почв

Параметры	Виды почв по содержанию гумуса			
	сильногумусированные	среднегумусированные		
	$AЧ_{ГП}^{\ominus}+AЧ_{ГП}^{\Gamma}$ (n = 13)	$AЧ_{ГП}^{\ominus}+AЧ_{ГП}^{\Gamma}$ (n = 17)	$AC_{Г}^{\ominus}$ (n = 15)	AC^{\ominus} (n = 12)
$I_{pH(KCL)}$	0,68 ± 0,06	0,68 ± 0,04	0,65 ± 0,07	0,67 ± 0,06
$I_{гумус}$	0,94 ± 0,11	0,48 ± 0,2*	0,54 ± 0,15*	0,41 ± 0,12*
$I_{калий}$	0,65 ± 0,09	0,52 ± 0,1*	0,54 ± 0,14**	0,60 ± 0,16
$I_{фосфор(Чириков)}$	0,66 ± 0,12	1,0 ± 0,01*	0,96 ± 0,08*	0,97 ± 0,09*
$I_{фосфор(Карпинский-Замятина)}$	0,41;0,39;0,46	0,50;0,46; 0,30	0,45;0,27;1,0	0,46 ± 0,35
$I_{фосфор(Николов)}$	0,58;0,64;1,0	0,80;0,85;1,0*	0,74 ± 0,41	0,84;0,97;1,0*
$I_{ок} (I_{pH}; I_{гумус}; I_{фосфор(Чириков)}; I_{калий})$	0,73 ± 0,06	0,67 ± 0,05*	0,67 ± 0,05*	0,66; 0,64; 0,8**

Примечание. Для нормально распределенных данных представлены 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 агрочерноземах, ** отличия значимы при $p < 0,05$. Обозначения почв см. табл. 1

На основе формулы 2 и цифровых карт относительных индексов (I_{pH} , $I_{гумус}$, $I_{фосфор(Чириков)}$, $I_{калий}$) построена карта индекса и степени окультуренности пахотных почв (рис. 4).

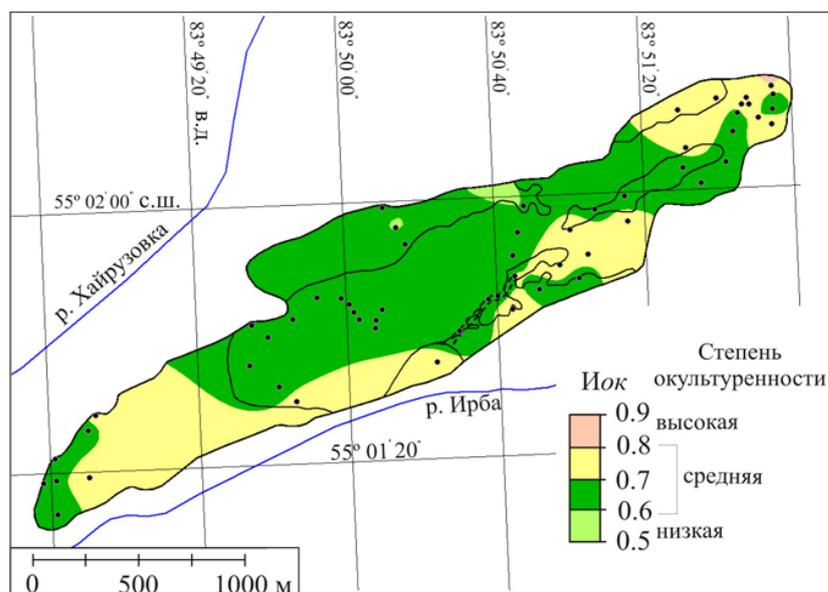


Рисунок 4. Карта индекса и степени окультуренности почв.

Несмотря на то, что содержание гумуса в сильногумусированных почвах близко к значению эталонной почвы (8%), а в среднегумусированных почвах существенно ниже, степень окультуренности почв одинаковая и соответствует среднему уровню. Это связано с более высоким содержанием подвижного фосфора по Чирикову в среднегумусированных почвах. Таким образом, среднегумусированные почвы (агрочерноземы, агротемно-серые и агросерые) могут иметь близкую качественную оценку с сильногумусированными агроценозами. Следовательно, на близких по качеству почвах продуктивность зерновых культур должна быть приблизительно одинаковой. Согласно полученным данным (табл. 2) различия между запасами надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси, произрастающей на сильно- и среднегумусированных почвах, не выявлены. Однако для более надежного вывода, необходима оценка различий по итоговой урожайности зерна, а не только запасов надземной фитомассы.

Выше был рассмотрен метод оценки степени окультуренности почв по относительным индексам агрохимических свойств, включая в расчеты $I_{\text{фосфор}}$ по Чирикову. Однако при оценке плодородия почв Новосибирской области в отношении фосфорного питания необходимо учитывать специфику фосфатного фонда, заключающуюся в преобладании малодоступных высокоосновных фосфатов кальция и их окклюзированных форм (Аверкина, Синещев, Ткаченко, 2011). При определении содержания подвижного фосфора в почвах методом Чирикова экстрагентом (0,5 М CH_3COOH) извлекается некоторая часть малодоступных растений фосфатов, следовательно, результаты получаются завышенными и не объективными. Поэтому для решения вопросов фосфорного питания растений и оценки обеспеченности почв подвижным фосфором перспективным является использование более слабых экстрагентов, таких как 0,1 М яблочнокислый аммоний (подвижный фосфор по Николову) и 0,015 М сернокислый калий (легкоподвижный фосфор по Карпинскому-Замятиной). Эти методы подходят для оперативной или предпосевной оценки минерального питания растений фосфором (Николов, 1986; Почвенно-агрохимические проблемы..., 1989; Якутина, 2006). Кроме этого необходимо подчеркнуть, что существуют несоответствия в оценке уровня обеспеченности почв фосфором при использовании различных градаций. Сравнительный анализ данных с использованием градаций (Методические..., 2003) показал, что содержание подвижного фосфора по Чирикову в сильно- и среднегумусированных почвах (табл. 2) соответствовало повышенному и высокому уровню, по откорректированным шкалам для зерновых культур в Предсалаирье Новосибирской области (Аверкина, Синещев, Ткаченко, 2011) среднему и высокому уровню. Обеспеченность почв подвижным фосфором по Николову (табл. 2) соответствовала среднему уровню (Николов, 1986; Якутина, 2006), легкоподвижным фосфором по Карпинскому-Замятиной низкому уровню (Почвенно-агрохимические..., 1989; Аверкина, Синещев, Ткаченко, 2011). Таким образом, для расчета относительного индекса по фосфору перспективным направлением является усовершенствование методики Т.Н. Кулаковской и использование в вычислениях $I_{\text{ок}}$ (индекса и

степени окультуренности почв) данных по относительным индексам, рассчитываемых на основе содержания легкоподвижного фосфора по Карпинскому-Замятиной и подвижного фосфора по Николову. Для решения поставленной задачи были приняты следующие минимальные значения содержания в почвах подвижных форм фосфора: P_2O_5 по Карпинскому-Замятиной 0,05 мг/кг, P_2O_5 по Николову 0,5 мг/100 г. За оптимальные уровни содержания подвижных форм фосфора в почвах при возделывании зерновых культур условно приняты следующие значения: P_2O_5 по Карпинскому-Замятиной 0,66 мг/кг, P_2O_5 по Николову 3,8 мг/100 г. Эти значения, согласно исследованиям (Аверкина, Синещев, Ткаченко, 2011; Николов, 1986; Якутина, 2006), соответствуют повышенному уровню обеспеченности почв подвижными формами фосфора. С использованием вышеприведенных условий и формулы 1 построены карты относительных индексов содержания фосфора, определяемого по Карпинскому-Замятиной и по Николову (рис. 5, А, Б).

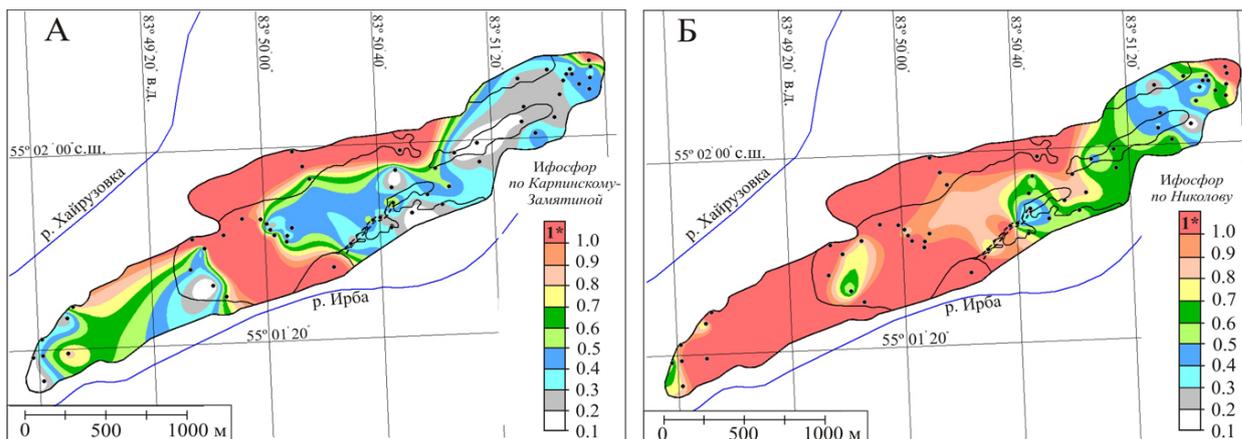


Рисунок 5. Карты относительных индексов содержания легкоподвижного фосфора по Карпинскому-Замятиной (А) и подвижного фосфора по Николову (Б). 1* фактическое значение выше оптимального. Условные обозначения см. рис. 1.

Карта относительного индекса $I_{\text{фосфор}}$ по Карпинскому-Замятиной показывает, что на изучаемой территории встречаются ареалы почв, в которых $I_{\text{фосфор}}$ и, соответственно, содержание легкоподвижного фосфора ниже в 1,3-10 раз по сравнению с оптимальным значением. Это говорит о том, что на значительной площади в почвах содержится недостаточное количество легкоподвижного фосфора, который поглощается растениями в первую очередь. Различия по содержанию легкоподвижного фосфора и $I_{\text{фосфор}}$ по Карпинскому-Замятиной в сильно- и среднегумусированных почвах недостоверны (табл. 2, 3).

Карта относительного индекса $I_{\text{фосфор}}$ по Николову (рис. 5 Б), а также данные таблицы 2 показывают, что среднегумусированные агрочерноземы, агротемно-серые и агросерые почвы содержат в 1,2-1,5 раза больше подвижного фосфора по сравнению с сильногумусированными агрочерноземами.

Карты относительных индексов ($I_{\text{РН}}$, $I_{\text{гумус}}$, $I_{\text{калий}}$), а также карты $I_{\text{фосфор}}$ по Карпинскому-Замятиной и по Николову были использованы для расчета карт индекса окультуренности (рис. 6 А, Б). С учетом $I_{\text{фосфор}}$ по Карпинскому-Замятиной степень окультуренности почв значительной части исследуемой территории низкая; с учетом $I_{\text{фосфор}}$ по Николову средняя.

Легкоподвижный фосфор по Карпинскому-Замятиной и подвижный фосфор по Николову были единственными показателями из всех рассмотренных почвенных свойств, которые имели положительную корреляционную связь с запасами надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси, а также между собой эти формы фосфора имели тесную связь (табл. 4). Между содержанием подвижного фосфора по Чирикову и гумусом установлена обратная тесная корреляционная связь, что было выявлено и ранее в почвах эрозионно опасных склонов на юге Западной Сибири (Якутина, 2006; Якутина, Нечаева, Смирнова, 2011).

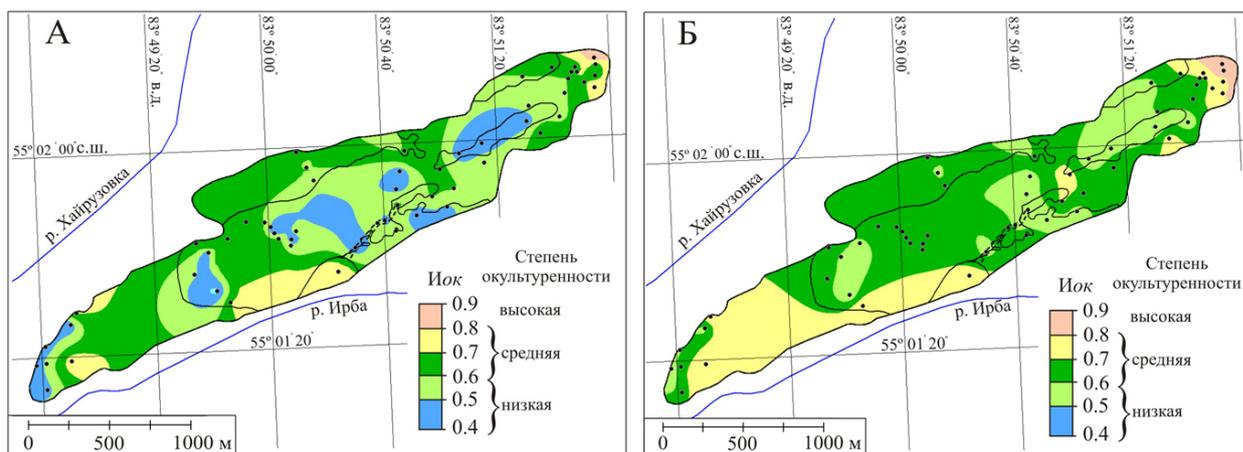


Рисунок 6. Карты индекса и степени окультуренности почв, рассчитанные с использованием относительных индексов (I_{pH} , $I_{гумус}$, $I_{калий}$) с учетом $I_{фосфор}$ по Карпинскому-Замятиной (А) и $I_{фосфор}$ по Николову (Б).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена (выделены серым цветом) между свойствами пахотного горизонта почв и запасами надземной фитомассы

Свойства почвы	Гумус	P_2O_5 по Чирикову	P_2O_5 по Карпинскому-Замятиной	P_2O_5 по Николову	K_2O по Масловой	pH солевой	ЗНФ
Гумус	–						
P_2O_5 по Чирикову	-0,75	–					
P_2O_5 по Карпинскому-Замятиной	<i>0,06</i>	<i>0,26</i>	–				
P_2O_5 по Николову	<i>-0,19</i>	<i>0,25</i>	0,66	–			
K_2O по Масловой	<i>0,33</i>	<i>-0,44</i>	<i>0,16</i>	<i>0,05</i>	–		
pH солевой	<i>0,25</i>	<i>-0,21</i>	<i>0,14</i>	<i>0,20</i>	<i>0,39</i>	–	
ЗНФ	<i>-0,09</i>	<i>0,23</i>	<i>0,41</i>	<i>0,33</i>	<i>-0,04</i>	<i>0,16</i>	–

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

Таким образом, для оперативной диагностики минерального питания растений фосфором необходимо использовать методы, которые объективно отражают уровень содержания в почве доступных растениям фосфатов.

Результаты исследований показали, что по цифровым картам относительных индексов агрохимических свойств и степени окультуренности почв можно оценить качественные и количественные почвенные параметры, определить географическое расположение ареалов почв с дефицитом тех или иных элементов питания и оценить их пригодность для возделывания сельскохозяйственных культур.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методология построения цифровых карт степени окультуренности пахотных почв Предсалаирской дренированной равнины, для которых в качестве основы послужили относительные индексы агрохимических свойств (pH_{KCl}, содержания гумуса, подвижного фосфора, обменного калия).

2. Статистически подтверждено, что содержание гумуса в среднегумусированных почвах (агрочерноземах, агротемно-серых и агросерых) на высотах 190-280 м ниже в 1,7-2,2 раза по сравнению с сильногумусированными агрочерноземами на высотах 280-310 м. Степень

окультуренности изученных почв средняя независимо от их гумусированности и типовой принадлежности. Индекс окультуренности сильно- и среднегумусированных почв имеет близкие значения, что связано с более высоким содержанием подвижного фосфора по Чирикову в менее гумусированных почвах.

3. Различия по значениям pH_{KCl} и содержанию легкоподвижного фосфора по Карпинскому-Замятиной между сильно- и среднегумусированными почвами не выявлены. Обеспеченность почв легкоподвижным фосфором на 2/3 части территории исследования ниже оптимального уровня ($<0,66$ мг/кг) и, соответственно, степень окультуренности почв низкая. Для объективной диагностики минерального питания культурных растений фосфором необходимо учитывать специфику фосфатного фонда почв исследуемой территории, использовать по возможности откорректированные шкалы и несколько методов, включая определение легкоподвижного фосфора.

4. Содержание подвижного фосфора в среднегумусированных почвах выше в 2,0 раза (по Чирикову) и 1,3 раза (по Николову) по сравнению с сильногумусированными почвами. При этом содержание подвижного фосфора по Чирикову в сильногумусированных почвах ниже оптимального уровня (<20 мг/100 г), в среднегумусированных выше оптимального уровня; обеспеченность почв подвижным фосфором по Николову средняя.

5. Обменный калий в пахотных почвах распределен неравномерно: в среднегумусированных агрочерноземах и агротемно-серых почвах содержание калия в среднем ниже в 1,2 раза по сравнению с сильногумусированными агрочерноземами, с агросерыми среднегумусированными почвами различия недостоверны. В целом содержание обменного калия в почвах ниже оптимального уровня (<30 мг/100 г).

6. Различия по запасам надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси на сильно- и среднегумусированных почвах недостоверны. Установлена положительная корреляционная связь запасов надземной фитомассы с содержанием в почвах легкоподвижного фосфора по Карпинскому-Замятиной ($r_s=0,41$) и подвижного фосфора по Николову ($r_s=0,33$).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Черепахиной Л.Д., Галузо Н.А., Писаревой О.Н., Бугровской Г.А. и Михаличенко Т.П. за помощь в проведении лабораторно-аналитических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверкина С.С., Синещиков В.Е., Ткаченко Г.И. Оценка методов определения фосфатов в черноземах Новосибирской области // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2011. № 11-12. С. 5-10.
2. Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли // *Исследование Земли из космоса*. 2016а. № 3. С. 66-74.
3. Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Применение цифровой модели высот (ASTER GDEM, 30 м) для оценки пространственной изменчивости содержания основных макроэлементов в агросерой почве склона // *Агрохимия*. 2016б. № 4. С. 46-54.
4. Галеева Л.П., Семендяева Н.В. Почвоведение: методические указания к курсовой работе. Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2012. 33 с.
5. Дубовик Е.В., Дубовик Д.В. Агрохимические свойства серых лесных почв склонового агроландшафта // *Агрохимия*. 2013. № 11. С. 19-25.
6. Звонкова Т.В. Прикладная геоморфология. М.: Высшая школа, 1970. 272 с.
7. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М.: Колос, 1973. 73 с.
8. Орлов А.Д. Эрозия и эрозионноопасные земли Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 208 с.
9. Каптанов А.Н., Явтушенко В.Е. Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 240 с.
10. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
11. Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 223 с.
12. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: ВО «Агропромиздат», 1990. 220 с.
13. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 240 с.
14. Николов Н. Усъвършенствование методи за контрол и регулиране на фосфора в почвите: Дис. «Доктор на селскостопанските науки» / Ин-т по почвознание Н. Пушкаров. София, 1986. 40 с.

15. Почвенно-агрохимические проблемы интенсификации земледелия Сибири: Сб. науч. тр. / ВАСХНИЛ. Сиб. отд.-ние. СибНИИЗХим. Новосибирск, 1989. 176 с.
16. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
17. Практикум по агрохимии: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
18. Савич В.И., Гукалов В.Н., Мансуров Б.А. Агроэкологическая оценка развития эрозии во времени и в пространстве // *Плодородие*. 2015. № 3. С. 40-42.
19. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 176 с.
20. Тюменцев Н.Ф. Методические указания по бонитировке почв Сибири на генетико-производственной основе. Новосибирск, 1979. 42 с.
21. Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 349 с.
22. Якименко В.Н., Нечаева Т.В. Действие и последствие калийных удобрений в Западной Сибири // *Вестник Международного института питания растений*. 2016. № 2. С. 9-13.
23. Якутина О.П. Изменение фосфатного фонда черноземных почв Западной Сибири под влиянием водной эрозии // *Агрохимия*. 2006. № 2. С. 16-21.
24. Якутина О.П., Нечаева Т.В., Смирнова Н.В. Режимы основных элементов питания и продуктивность растений на эродированных почвах юга Западной Сибири // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2011. № 1. С. 16-22.
25. 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.

*Поступила в редакцию 13.03.2017;
принята 22.02.2018; опубликована 26.02.2018*

Сведения об авторах:

Гопп Наталья Владимировна - к.б.н., научный сотрудник, лаборатории географии и генезиса почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г.Новосибирск, natalia.gopp@gmail.com;

Нечаева Таисия Владимировна - к.б.н., научный сотрудник лаборатории агрохимии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г.Новосибирск, taya_@inbox.ru;

Савенков Олег Александрович - к.б.н., научный сотрудник лаборатории агрохимии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г.Новосибирск, oleg.a.savenkov@mail.ru;

Смирнова Наталья Валентиновна - к.б.н., научный сотрудник лаборатории агрохимии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г.Новосибирск, nat-smirnova@yandex.ru;

Смирнов Валентин Валентинович - программист, ФГБУН Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия, valentiv.smirnov@gmail.com;

Смирнов Александр Валентинович - студент Алтайского государственного университета, Барнаул, Россия, sanya.smirnov.fantom@gmail.com.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

DIGITAL MAPPING OF SOIL FERTILITY INDEX CALCULATED FOR ARABLE SOILS OF THE CIS-SALAIR DRAINED PLAIN

© 2018 N.V. Gopp¹, T.V. Nechaeva¹, O.A. Savenkov¹, N.V. Smirnova¹, V.V. Smirnov², and A.V. Smirnov³

Address: ¹Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: natalia.gopp@gmail.com

²Institute of Computational Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: valentiv.smirnov@gmail.com

³Altai State University, Barnaul, Russia. E-mail: sanya.smirnov.fantom@gmail.com

The article describes comparison of soil fertility indices (SFI) calculated for the ploughed layer of arable soils differing in soil organic matter (SOM) content: with high (5-8%) and medium (3-5%) SOM content. The studied soils were located on erosion-prone slope at different altitudes: soils with high SOM at 280-310 m,

and soils with medium SOM at 190-280 m a.s.l. The study area was located in the interfluvial area between the Irba and the Hiruzovka rivers in the Cis-Salair drained plain in the south-east of West Siberia. The soil types common there are Greyzemic Luvic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic), Phaeozems (Siltic, Aric), Greyzemic Phaeozems Colluvic (Siltic, Taptomollic). The SFI were calculated in two steps. First, the relative indices (RI) for every agrochemical property, i.e. pHKCl, SOM, acetic acid extractable phosphorus (P) and exchangeable potassium (K), were calculated on the basis of respective minimal and optimal soil concentrations and crop requirements. Second, the SFI were calculated as sums of the relative indices divided by 4. The resultant SFI values were rated according to the scale where values below 0.4 indicate low fertility; values ranging 0.41-0.60 indicate moderate fertility, whereas values ranging 0.81-1.0 indicate high fertility. The digital maps of the RI and SFI were created using raster calculator in ENVI software, which allows performing mathematical operations with quantitative parameters of raster image pixels in GeoTIFF format. The values of relative indices in raster cells exceeding 1 (that is when factual content is higher than the optimal one) were substituted with 1 by specially developed program called ZChanger. Then the SFI map was created for erosion-risky slopes using as a basis the digital maps of the relative indices for pHKCl, SOM, P and K. Phosphorus was extracted by two different extragents, namely 0.5 M acetic acid (PAA) and 0.1 M ammonium malate (PAM). Soil fertility index was rated as medium irrespective of SOM content and soil type due to the high PAA content in soils with less SOM. It was found that when SFI were calculated using the data on easily available soil P, i.e. extracted with 0.015 M K₂SO₄ (PPS), then for most of the study area SFI can be rated as low, indicating the deficit of plant available phosphates in soils. High- and medium-SOM soils did not differ in pHKCl and PPS. The medium-SOM soils, such as agrochernozems, agro-grey and agro-dark-grey ones, had 1.7-2.2 lower SOM content as compared with the high-SOM soils such as agrochernozems. The reverse relation was found in labile P content: in soils with medium SOM level the PAA and PAM contents were 2 and 1.3 times higher than in high-SOM soils, respectively. In high-SOM agrochernozems PAA was lower than the optimal level (<20mg/100 g soil), while in medium-SOM soils it was higher. The PAM could be rated as medium. Exchangeable K in the arable soils was found to be unevenly distributed: in medium-SOM agrochernozems and agro-dark-grey soils exchangeable K was on average 1.2 times lower as compared with high-SOM agrochernozems, the difference with medium-SOM agro-grey soils being statistically not significant. Overall exchangeable K was lower than the optimal level (<30mg/100 g soil) Above-ground phytomass was found to be positively correlated with soil labile PPS ($r_s=0.41$) and PAM ($r_s=0.33$). The difference in aboveground phytomass produced by oats and peas mixture between high- and medium-SOM soils was not statistically significant. **Key words:** humus, pH, available and easily available phosphorus, exchangeable potassium, aboveground phytomass, Chernozem, Phaeozem, digital soil mapping.

How to cite: Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V., and Smirnov A.V. Digital mapping of the degree of soil cultivation of the plowing soils of the Cis-Salair drained plain // *The Journal of Soils and Environment*. 2018. 1(1):32-44. (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Averkina S.S., Sineshchekov V.E., Tkachenko G.I. Assessment of phosphate determination methods in chernozem soils of Novosibirsk region, *Siberian Bulletin of Agricultural Science*, 2011, No. 11-12, p. 5-10. (in Russian)
2. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Effect of Mesorelief of the Slope on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index According to Remote Sensing Data, *The Study of Earth from Space*, 2016a, No.3, p. 66-74. (in Russian)
3. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Application of digital elevation models (ASTER GDEM, 30 m) to estimate the spatial variability of the content of basic macronutrients in agrogrey soil of the slope, *Agrochemistry*, 2016b, No.4, p. 46-54. (in Russian)
4. Galeeva L.P., Semendyaeva N.V. Soil Science: Methodical Instructions for Course Work, *Novosibirsk, Novosibirsk State Agricultural University*, 2012, 33 p. (in Russian)
5. Dubovik E.V., Dubovik D.V. Agrochemical Properties of Gray Forest Soils in a Sloped Agrolandscape, *Agrochemistry*, 2013, No.11, p.19-25. (in Russian)
6. Zvonkova T.V. Applied geomorphology, *Moscow, Higher school*, 1970, 272 p. (in Russian)
7. Union manual on soil surveys and development of large scale soil maps of land use, *Moscow, Kolos*, 1973. 73 p. (in Russian)
8. Orlov A.D. Erosion and eroded of land in Western Siberia, *Novosibirsk, Nauka*, 1983, 208 p. (in Russian)
9. Kashtanov A.N., Yavtushenko V.E. Agroecology soil slopes, *Moscow, Kolos*, 1997, 240 p. (in Russian)
10. Classification and Diagnostic System of Russian Soils, *Smolensk, Oikumena*, 2004, 342 p. (in Russian)
11. Classification and Diagnostics of Soils of the Soviet Union, *Moscow, Kolos*, 1977, 223 p. (in Russian)
12. Kulakovskaya T.N. Optimization of agrochemical soil system power plants, *Moscow, Agropromizdat*, 1990, 220 p. (in Russian)
13. Practical Manual for Conducting Comprehensive Monitoring of Soil Fertility of Agricultural Land, *Moscow, Rosinformagrotech*, 2003, 240 p. (in Russian)

14. *Nikolov N.* Improvement methods of control and regulation of phosphorus in soils: Diss. «Doctor of agricultural Sciences» / Institute of Soil Science N. Pushkareva. Sofia, 1986. 40 p.
15. *Soil and agrochemical problems of intensification of agriculture in Siberia* (Collection of scientific papers), Novosibirsk, 1989, 176 p. (in Russian)
16. *Field Guide for Correlation of Russian Soils*, Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p. (in Russian)
17. Workshop on agrochemistry: Tutorial. 2nd edition, revised and enlarged / Edited by academician V.G. Mineev, Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2001, 689 p. (in Russian)
18. *Savich V.I., Gukalov V.N., Mansurov B.A.* Agroecological estimation of erosion development in time and space, *Fertility*, 2015, No.3, p. 40-42. (in Russian)
19. *Tanasienko A.A.* Specific features of soil erosion in Siberia, *Novosibirsk, Siberian Branch of RAS*, 2003, 176 p. (in Russian)
20. *Tyumentsev N.F.* Methodical instructions for the classification of soils in Siberia on a genetic-production basis, Novosibirsk, 1979, 42 p. (in Russian)
21. *Khmelev V. A., Tanasienko A. A.* Land resources of the Novosibirsk region and ways of their rational use, *Novosibirsk, Siberian Branch of RAS*, 2009, 349 p. (in Russian)
22. *Yakimenko V.N., Nechaeva T.V.* Effect and aftereffect of potassium fertilizers in West Siberia, *IPNI Newsletter in Russian*, 2016, No.2, p.9-13. (in Russian)
23. *Yakutina O.P., Nechaeva T.V., Smirnova N.V.* The main nutritious regimes and plant production on the eroded soils in the south of West Siberia, *Problems of Agrochemistry and Ecology*, 2011, No.1, p.16-22. (in Russian)
24. *Yakutina O.P.* Changes of phosphate reserve Chernozem soils of Western Siberia under the influence of the water erosion, *Agrochemistry*, 2006, No.2, p.16-21.
25. 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.

Received 13 March 2017;
Accepted 22 February 2018;
Published 26 February 2018

About authors:

Gopp Natalya V. - Candidate of Biological Sciences, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, natalia.gopp@gmail.com;

Nechaeva Taisia V. - Candidate of Biological Sciences, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, taya_inbox.ru;

Savenkov Oleg A. - Candidate of Biological Sciences, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, oleg.a.savenkov@mail.ru;

Smirnova Natalya V. - Candidate of Biological Sciences, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, nat-smirnova@yandex.ru;

Smirnov Valentin V. - Programmer, Institute of Computational Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, valentiv.smirnov@gmail.com;

Smirnov Aleksandr V. – student of Altai State University, Barnaul, Russia, sanya.smirnov.fantom@gmail.com.

The author read and approved the final manuscript.



The article are available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)