

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4:528.92.94

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДЕГРАДИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ПАШНИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ¹

© 2021 г. Д. И. Рухович^а, *, П. В. Королева^а, Н. В. Калинина^а, Е. В. Вильчевская^а,
Г. А. Сулейман^а, Г. И. Черноусенко^а

^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: landmap@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.2020 г.

После доработки 11.06.2020 г.

Принята к публикации 27.06.2020 г.

Развитие технологий точного земледелия привело к созданию карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв на основе анализа больших данных дистанционного зондирования (remote sensing big data). Для создания карт проанализированы тысячи данных дистанционного зондирования за 35 лет на каждый элемент земной поверхности. Проведенный анализ позволяет четко детектировать зоны пониженного плодородия. В свою очередь зоны пониженного плодородия являются индикаторами негативных почвенных свойств. Часть негативных свойств имеет природно-естественное происхождение, а другая является следствием процессов деградации. Разделить зоны пониженного плодородия естественного и антропогенного происхождения можно на основе анализа параметров рельефа и технологии спектральной окрестности линии почв. Комбинация различных методов анализа больших данных дистанционного зондирования и параметров ландшафта, позволила создать карты распространения деградированных земель с точностью, достаточной для технологий точного земледелия. В работе приведены результаты выделения на пахотных почвах трех естественных и четырех — антропогенных факторов снижения плодородия. Выделенные анализом данных дистанционного зондирования территории распространения факторов деградации верифицированы полевой почвенной съемкой. Достигнутые результаты являются прямым следствием развития технологий больших данных дистанционного зондирования. Почвоведы-картографы и сельскохозяйственные производители получили новый метод детектирования территорий распространения факторов деградации.

Ключевые слова: деградация почв, большие данные дистанционного зондирования, устойчивая внутриполевая неоднородность плодородия почв, спектральная окрестность линии почв, ГИС

DOI: 10.31857/S0032180X21020131

ВВЕДЕНИЕ

Деградация пашни на Восточно-Европейской равнине — сложный многофакторный процесс [1, 3, 5, 6, 9, 20, 22, 41]. При детальном исследовании деградация фиксируется локально [1, 2, 19, 20, 23, 27, 39]. Области пониженного плодородия почв формируются на деградированных землях внутри сельскохозяйственных полей [38, 50]. Развивается внутриполевая неоднородность. Процессы деградации постепенно трансформируют природную структуру почвенного покрова [24]. Формируется новая пространственная неоднородность распространения почв. Новая структура почвенного покрова включает в себя естественные, распаханые недеградированные и распаханые деградированные почвы (смытые, дефлированные,

переувлажненные, вторично засоленные, переуплотненные и др.). Усложнение структуры почвенного покрова затрудняет традиционное почвенное картографирование [13] на основе наземных изысканий. Недостающие наземные данные компенсируют различными моделями деградационных процессов. Модели используют более доступные климатические данные [46, 49], цифровые модели местности, цифровые модели рельефа и др. [4, 11, 12, 21]. Широко распространены регрессионные модели, устанавливающие функциональные связи между спектральными характеристиками данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и свойствами почв [31, 33, 35, 42]. Имитационное и регрессионное моделирование имеет существенный недостаток — моделируется один процесс или фактор. Точность модели оценивается по одному моделируемому параметру. Реальное сельскохозяйственное поле очень редко можно описать однофакторной моделью. Сочетание не-

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi 10.31857/S0032180X21020131.

Таблица 1. Краткая характеристика районов исследования

Район исследования	Преобладающие почвы	Высота, над ур. м., м	t , °C	Σ_{oc} , мм
Зерноградский район Ростовской области	Черноземы обыкновенные карбонатные малогумусные сверхмощные глинистые и тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах	100	10.6	537.9
Изобильненский район Ставропольского края	Черноземы типичные малогумусные сверхмощные глинистые и тяжелосуглинистые на покровных лёссовидных суглинках	210	11.9	622.0
Новокубанский район Краснодарского края	Черноземы типичные малогумусные сверхмощные тяжелосуглинистые на покровных лёссовидных суглинках	220	10.8	617.5
Усть-Лабинский район Краснодарского края	Черноземы типичные малогумусные сверхмощные тяжелосуглинистые на покровных лёссовидных суглинках	70	11.9	703.5
Знаменский район Тамбовской области	Луговато-черноземные обычные среднегумусные мощные тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах	170	5.5	528.3
Балаковский район Саратовской области	Черноземы южные слабогумусированные маломощные легкосуглинистые на лёссовидных суглинках	70	6.8	418.8
Татищевский район Саратовской области	Черноземы обыкновенные остаточные карбонатные слабогумусированные среднеспособные легкосуглинистые опесчаненные на лёссовидных суглинках	260	6.5	466.7

Примечание. t — среднегодовая среднепогодная температура воздуха, Σ_{oc} — среднегодовая сумма осадков.

скольких однофакторных моделей на одном поле резко понижает точность моделирования. Традиционная почвенная карта является многофакторной моделью местности. Фактическая картина распространения деградированных почв имеет существенные отличия от моделируемых.

Альтернативой регрессионным зависимостям и имитационному моделированию являются технологии больших данных [30]. Большие данные применяются в географии [40, 45] и сельском хозяйстве в виде больших геоданных (big geo data), больших спутниковых данных (больших данных дистанционного зондирования, big satellite data (remote sensing big data)) и больших сельскохозяйственных данных (big agriculture data) [32, 34, 36]. Подходы больших сельскохозяйственных данных разработали корпорации Intel [28] и Semanticcommunity [29]. Результатами алгоритмов обработки больших спутниковых данных являются карты внутриполевой неоднородности типа TF (Talking Fields) компании NEXT farming [44] или карты устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв компании Agronote (ASF-индекс) [38]. На основе карт устойчивой внутриполевой неоднородности создаются карты-задания для умного (точного) земледелия. Еще одним вариантом использования больших спутниковых данных при изучении трансформации почвенного покрова является прямое почвенное картографирование на основе технологии спектральной окрестности линии почв [7, 8, 14, 15].

Карты устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв позволяют разделить пространство сельскохозяйственного поля на зоны с различным уровнем плодородия [38, 44, 48]. Часть территории интерпретируется как зоны пониженного плодородия, другая часть — как зоны нормального плодородия, а третья — как зоны повышенного плодородия. Иногда выделяется дополнительная зона очень низкого плодородия. Некоторая часть зон пониженного плодородия почвенного покрова является также деградированной территорией. Следовательно, можно предположить, что технологии дистанционного зондирования больших данных могут дать возможность детектировать деградированные участки пашни.

Цель работы — проверить информативность методов обработки дистанционного зондирования больших данных, используемых для точного земледелия, для определения местоположения деградированных почв.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены в восьми регионах юга России (рис. 1S) на площади 127 тыс. га.

Характеристики районов исследования приведены в табл. 1.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным методом работы является технология анализа больших данных. Ограничиться в

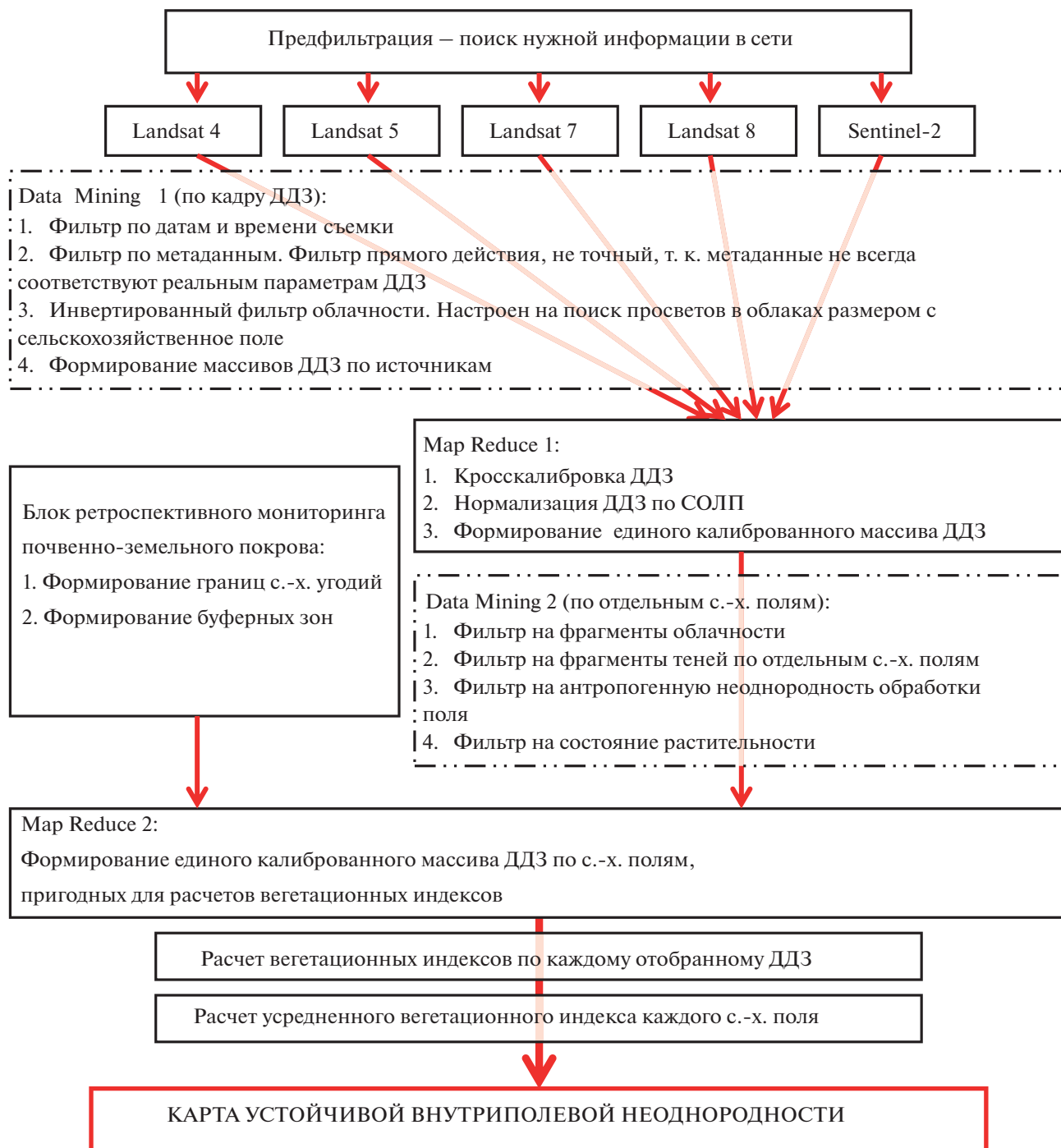


Рис. 1. Схема обработки больших спутниковых данных для получения карты устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

описании методов простым упоминанием больших данных нельзя, так как это широкое понятие, требующее конкретики для каждого исследования. В настоящей работе комплекс процедур по обработке больших данных сведен в две блок-схемы. Первая описывает процедуру вычисления карт устойчивой внутриполевой неоднородности. Вторая демонстрирует процедуру классифи-

кации зон плодородия по видам негативных почвенных процессов.

Обработка больших массивов спутниковых данных для построения карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв. Блок-схема обработки больших спутниковых данных представлена на рис. 1. На каждое поле хозяйства обрабатывается массив спутниковых данных из откры-

Таблица 2. Урожайность культур по зонам плодородия, т/га

№ (рисунок)	Культура	Зона плодородия			
		очень низкого	пониженного	нормального	повышенного
1	Озимая пшеница	5.98	6.77	7.06	8.17
2	»	—	7.03	7.26	8.42
3 (4В)	»	6.65	7.56	7.66	8.70
4 (4Г)	»	6.39	7.10	7.37	7.90
5	»	—	8.00	8.23	9.70
6 (4А)	»	—	7.21	8.15	7.96
7	»	—	8.09	7.84	7.32
8 (4Д)	»	—	7.89	8.39	8.08
9	»	—	2.18	3.56	3.23
10 (4Е)	»	—	1.54	2.50	4.24
11	»	—	1.04	1.66	2.06
12	»	—	1.71	1.99	2.78
13	»	—	1.74	2.05	2.48
14	»	—	1.63	2.08	2.81
15	Чечевица	—	1.10	1.16	1.54
16	»	—	0.56	0.67	1.06
17	»	—	0.97	1.44	2.24
18	Ячмень	—	2.17	2.95	4.43
19 (4Ж)	»	—	1.46	1.90	2.27
20	»	—	0.90	1.17	1.75
21	Кукуруза	—	6.37	—	7.71
22	»	—	4.11	—	5.61
23	Подсолнечник	—	2.26	3.22	3.44
24	»	—	2.45	3.05	3.35
25	»	—	2.18	2.84	2.99

тых источников (Landsat 4, 5, 7, 8 и Sentinel-2) в количестве 1000 кадров. Процедура отбора состоит из двух блоков данных (Data Mining) и двух процедур (MapReduce). В Data Mining задействованы 8 фильтров для отбора ДДЗ. MapReduce состоит из 4 процедур-алгоритмов. В результате на каждое сельскохозяйственное поле формируется массив спектральных данных за 35 лет (с 1984 по 2019 гг.). Массив состоит из ДДЗ, пригодных для расчетов ASF-индекса [38, 50] в количестве 20–40 кадров на поле. Отобранные ДДЗ подвергнуты калибровке на основе технологии спектральной окрестности линии почв [10]. Для исключения влияния на расчеты ASF-индекса спектральных характеристик лесополос, дорог, водных объектов и др., используются буферные зоны от границ сельскохозяйственных полей. Границы полей создаются по технологии ретроспективного мониторинга почвенно-земельного покрова [16, 17]. Расчет ASF-индекса ведется для каждого поля по всем отобранному и калиброванным ДДЗ.

Математически ASF-индекс является среднеемноголетним значением вегетационного индекса EVI+ [35], рассчитанного по ДДЗ, нормализованным по технологии спектральной окрестности линии почв [7, 10]. Биологически ASF-индекс отражает среднеемноголетнее состояние сельскохозяйственной растительности. Агрономически ASF-индекс — это индикатор уровня плодородия почв в пределах одного сельскохозяйственного поля — карта устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия (табл. 2).

При расчетах ASF-индекса можно разделить сельскохозяйственное поле на произвольное количество градаций. Реально в расчетах используются 3 или 9 градаций, которые интерпретируются как зоны пониженного плодородия, нормального плодородия и повышенного плодородия. При резком отличии плодородия отдельных фрагментов поля добавляется еще одна градация — зона очень низкого плодородия. При разделении поля на 3 зоны обычно соблюдается равенство площадей зон.

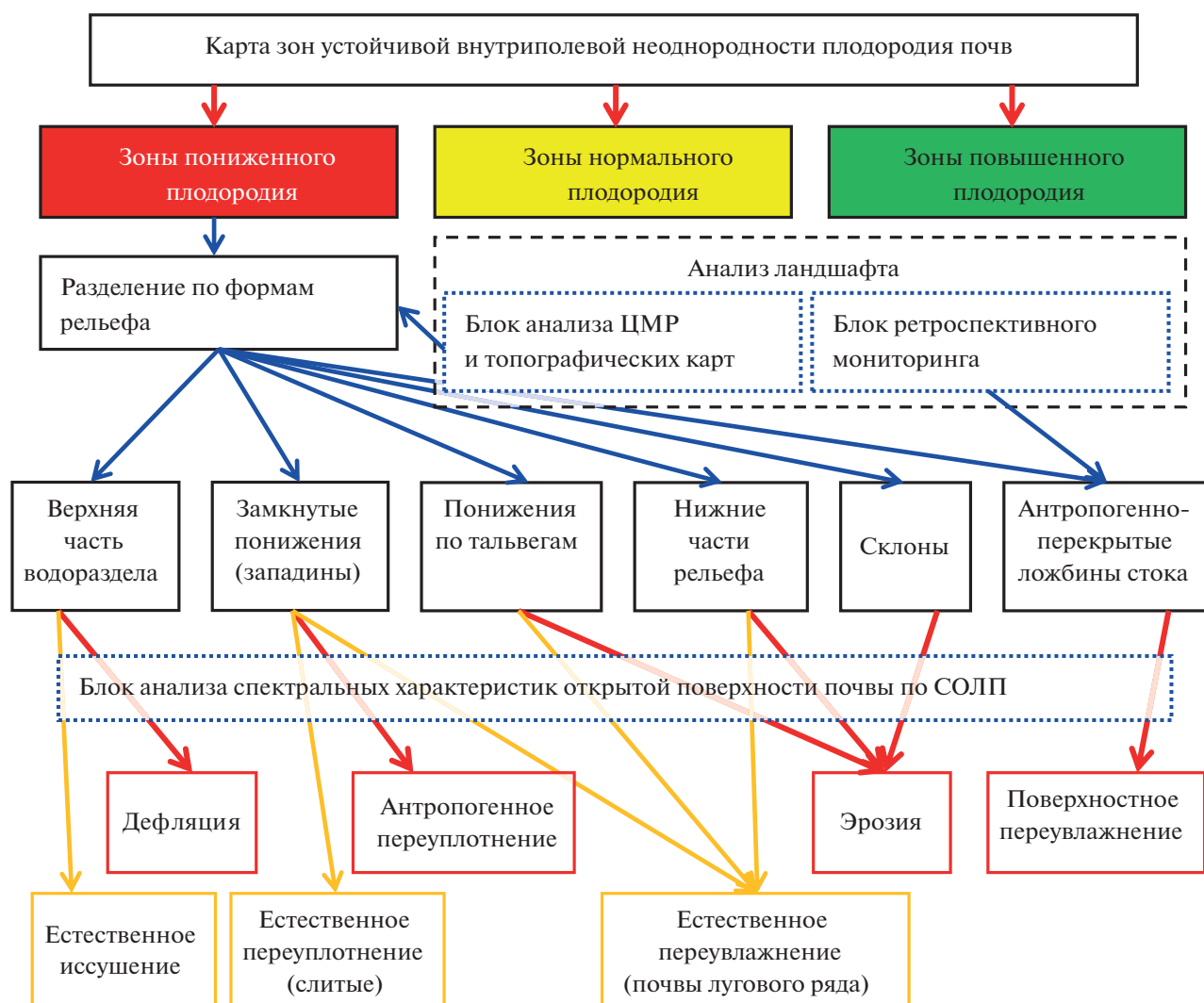


Рис. 2. Схема классификации зон плодородия по типам процессов деградации почв.

Классификация зон плодородия карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

Карта устойчивой внутриполевой неоднородности (ASF-индекс) рассчитывается на основе автоматических методов. Выделенные зоны плодородия не требуют наземной калибровки, так как отражают среднесуточное состояние растительности. Зоны плодородия не несут информации о причинах низкого или высокого плодородия. Для классификации зон пониженного плодородия по негативным почвенным свойствам используют анализ ландшафта. Блок-схема анализа ландшафта представлена на рис. 2, примеры карт распределения ASF-индекса на рис. 3. Для реализации классификации ландшафта применяют методы ретроспективного мониторинга [16, 17], анализ спектральной окрестности линии почв [7, 10, 14, 15] и морфометрических величин цифровых моделей рельефа (ЦМР) [19, 39, 51, 52]. Результатом клас-

сификации является разделение зон пониженного плодородия на 7 групп.

Наземная верификация. В работе проводили проверку правильности выделения зон плодородия с помощью тестовых замеров урожайности сельскохозяйственных культур (табл. 2, 3). Для этого выполняли тестовые укосы по квадратам 1×1 м с последующим обмолотом. Примеры расположения точек замеров урожайности приведены на рис. 4. Закладкой почвенных разрезов с полевым описанием (рис. 4, 5, табл. 4) проверяли правильность классификации деградированных почв.

Описание закладки экспериментов.

1. Все карты ASF-индекса, используемые в данной работе, переданы в сельскохозяйственные предприятия на коммерческой основе согласно актам сдачи-приемки.

2. Даты актов всегда предшествовали наземным работам по ведению точного земледелия.

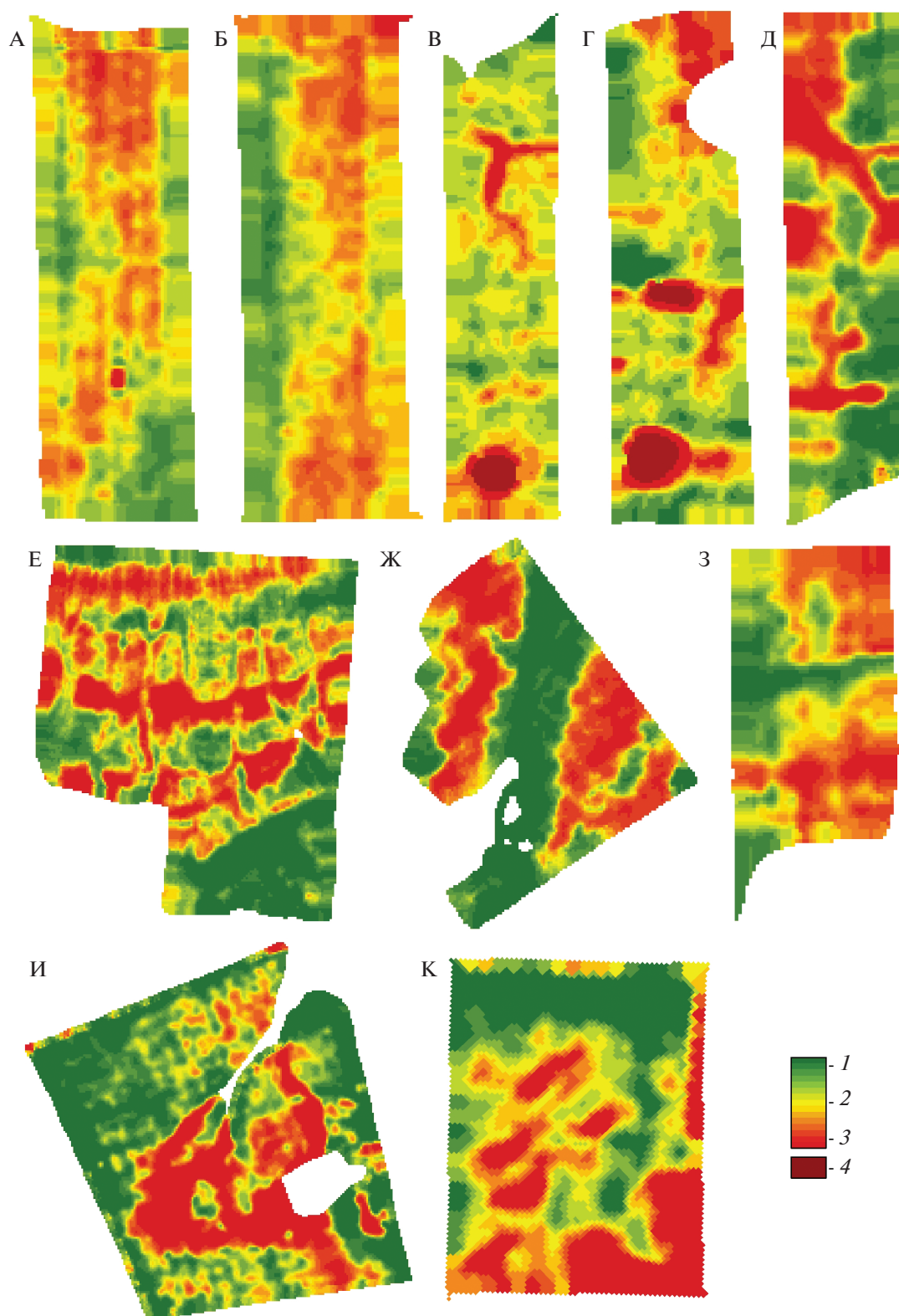


Рис. 3. Примеры карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия, 4 – зона очень низкого плодородия).

3. Даты актов всегда предшествовали работам по верификации карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

4. ASF-индекс рассчитывали на всю территорию каждого хозяйства.

5. Общая площадь хозяйств составила более 100 тыс. га.

6. Хозяйства расположены в Ростовской, Саратовской, Самарской, Липецкой, Тамбовской, Ульяновской областях, Краснодарском и Ставропольском краях (рис. 1S).

7. Поля для верификации ASF-индекса отбирали с учетом пожеланий сельскохозяйственных производителей.

8. Верификацию проводили на полях в различных субъектах Российской Федерации (табл. 2, 4).

Дополнительные методы, применяемые в работе:

1. Интеллектуальный анализ географических данных (Geographical data mining) [45].

2. Географические исследования, обусловленные данными (Data-driven geography) [43].

3. Многослойный мультитременной ГИС-анализ [18, 26].

4. Анализ географических мультитременных баз данных [41, 49].

5. Технология дифференцированного внесения средств химизации [38].

6. Расчеты вегетационных индексов [37, 47].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биологическая и агротехническая составляющая ASF-индекс. На рис. 3 представлены примеры карт устойчивой внутриполевой неоднородности, автоматически рассчитанные согласно блок-схеме на рис. 1. На рис. 4 приведена группировка зон плодородия (рис. 3) в 3 зоны, примерно равные по площади, и показаны примеры расположения точек замера урожайности, представленных в табл. 2. Для большинства полей (96% измерений) урожайность сельскохозяйственных культур меньше в зонах пониженного плодородия и больше в зонах повышенного плодородия. Урожайность в зонах нормального плодородия находится между ними в 84% измерений. Замеры урожайности вели на полях до применения систем точного земледелия, т.е. при равномерном распределении удобрений по полям.

Рассмотрим поле на рис. 4, К. Это поле из массива полей хозяйства Краснодарского края. На рис. 4, К дано расположение точек замера урожайности. Замеры урожайности проводили в 2017 и 2018 гг. В 2017 г. на поле была посеяна кукуруза на зерно. Дифференцированное внесение удобрений не проводилось. Недифференцированно проведена одна азотная подкормка аммиачной

Таблица 3. Отзывчивость озимой пшеницы (урожайность, т/га) на различные дозы удобрений по зонам плодородия (поле на рис. 4, К)

NH ₄ NO ₃ , кг/га	Зона плодородия		
	пониженного	нормального	повышенного
50 + 0	4.96	5.28	5.08
100 + 50	5.44	5.80	6.96
150 + 100	5.80	7.24	7.84
200 + 150	6.24	8.00	8.84

селитрой — 120 кг/га. Результаты замеров урожайности представлены в табл. 2 (запись 21). Как видно из таблицы, три зоны плодородия отличаются по урожайности на 1.3 т/га.

Отметим, что переход к точному земледелию, как правило, осуществляют грамотные и сильные хозяйства. В этих хозяйствах проведены агрохимические замеры и существуют агрохимические картограммы на каждое поле. Большинство хозяйств имеет выровненный агрофон по рекомендациям агрохимических служб. На полях данного хозяйства не обнаружено мест с пониженным содержанием питательных элементов (ни макроэлементов, ни микроэлементов). Зоны плодородия ASF-индекса на исследуемых полях не коррелировали с агрохимическими картограммами.

В 2018 г. проведен эксперимент с дифференцированным внесением удобрений. Под озимую пшеницу удобрения вносили 3 раза: основное внесение и две весенние азотные подкормки. В основное внесение и при посеве вносили аммофос + сульфат аммония ((NH₄)₂HPO₄ + (NH₄)₂SO₄; N — 12%, P — 52% + N — 21%, S — 24%), а при подкормках — аммиачную селитру (NH₄NO₃; N 26—34.4%, S 3—14%). Общая доза удобрений при эксперименте на разных участках поля составила 250, 350, 450 и 550 кг/га. Замеры урожайности проведены при всех возможных сочетаниях трех зон плодородия по ASF-индексу с различными дозами удобрений (табл. 3). Результаты обобщены на рис. 2S [38].

Табл. 2 и 3 подтверждают биологический и агротехнический смысл зон плодородия карт устойчивой внутриполевой неоднородности (ASF-индекс). Зоны пониженного плодородия действительно характеризуются меньшей продуктивностью сельскохозяйственных культур. Можно считать, что полученные анализом больших спутниковых данных карты являются картами плодородия почв. Кроме того, карты устойчивой внутриполевой неоднородности являются картами отзывчивости сельскохозяйственных культур на средства химизации (дозы минеральных удобрений). В таком виде ASF-индекс применяется в системах точного земледелия в виде карт заданий на внесение минеральных удобрений.

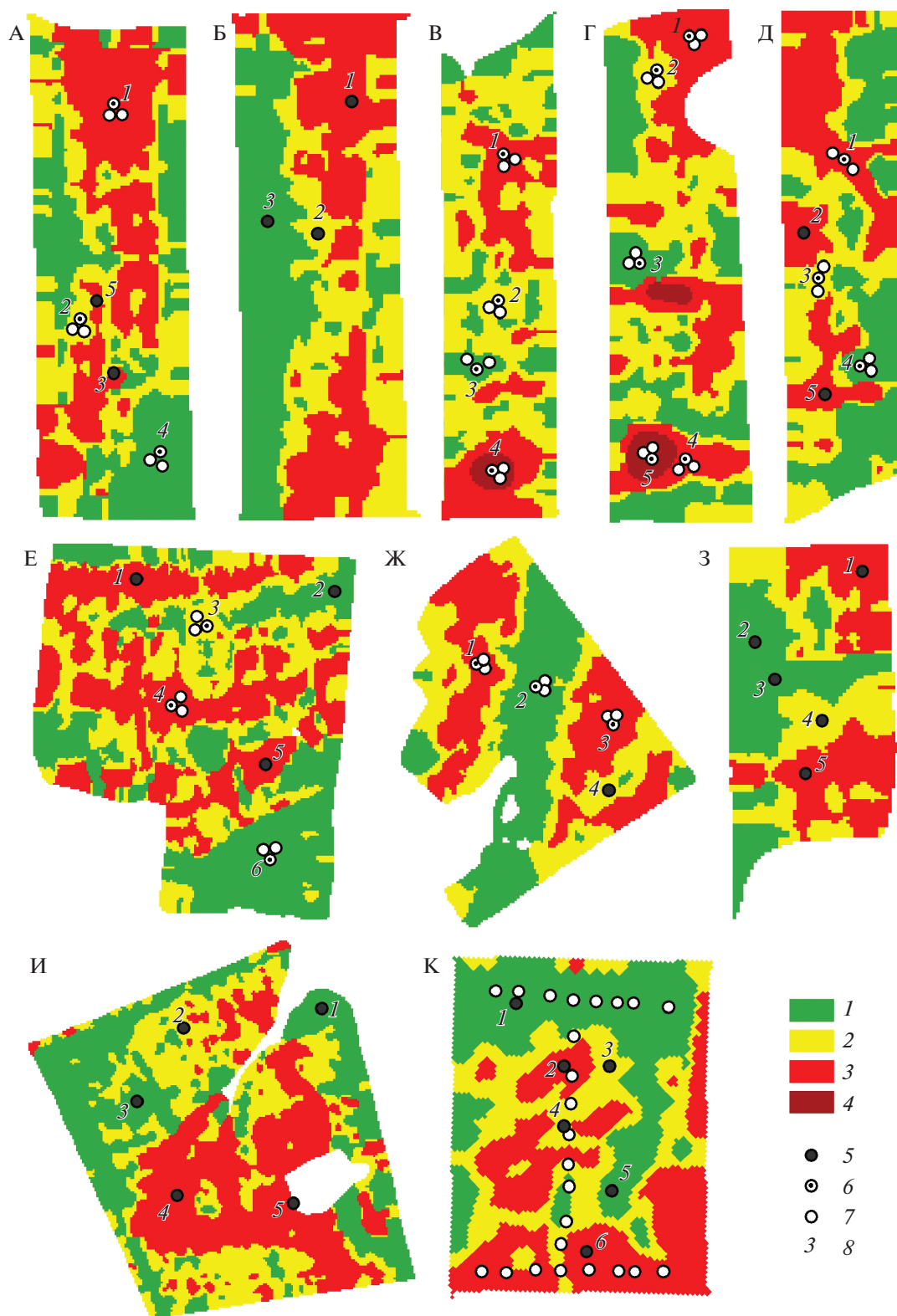


Рис. 4. Примеры генерализованных карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв, почвенные разрезы и точки замеров урожайности (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия, 4 – зона очень низкого плодородия, 5 – почвенные разрезы, 6 – почвенные разрезы и точки определения урожайности, 7 – точки определения урожайности, 8 – номера почвенных разрезов).

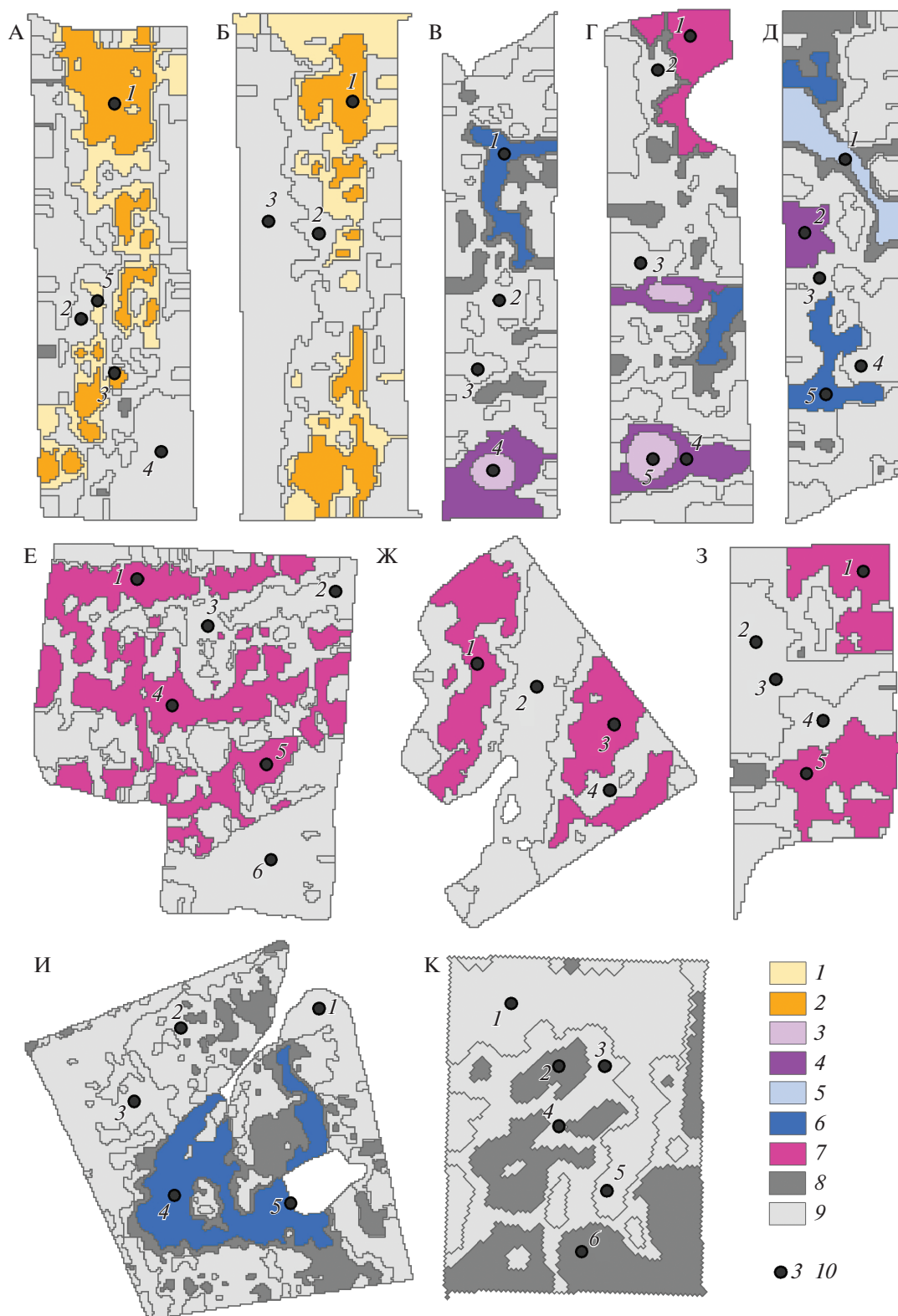


Рис. 5. Карты факторов деградации почв и номера почвенных разрезов (1 – естественное иссушение почвы, 2 – дефляция, 3 – естественное уплотнение почвы, 4 – антропогенное переуплотнение почвы, 5 – естественное переувлажнение, 6 – антропогенное переувлажнение почвы, 7 – водная эрозия, 8 – зона пониженного плодородия без проявлений признаков деградации почв, 9 – зоны нормального и повышенного плодородия, 10 – почвенные разрезы).

Таблица 4. Координаты расположения полей, номера разрезов, зоны плодородия, факторы снижения почвенного плодородия, почвы (рис. 4 и 5)

№	Зона плодородия	Фактор деградации	Почва	WRB
Поле А (41°30'48.957" Е, 45°25'24.094" N)				
1	Пониженного	Дефляция	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный среднемощный слабо-развешаемый легкоглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
2	Нормального	Не проявляется	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный мощный легкоглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
3	Пониженного	Дефляция	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный среднемощный слабо-развешаемый легкоглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
4	Повышенного	Не проявляется	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный мощный легкоглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
5	Пониженного	Естественное иссушение	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный мощный легкоглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
Поле Б (41°27'46.944" Е, 45°23'58.992" N)				
1	Пониженного	Дефляция	Чернозем обыкновенный карбонатный малогумусный среднемощный слабо-развешаемый тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
2	Нормального	Не проявляется	Чернозем обыкновенный карбонатный малогумусный мощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
3	Повышенного	Не проявляется	Чернозем обыкновенный карбонатный малогумусный мощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
Поле В (39°31'26.837" Е, 45°15'33.687" N)				
1	Пониженного	Поверхностное переувлажнение	Луговато-черноземная выщелоченная малогумусная сверхмощная глинистая на лёссовидных глинах	Luvic Stagnic Chernic Phaeozem (Clayic, Aric, Pachic)
2	Нормального	Не проявляется	Чернозем типичный слабогумусированный сверхмощный глинистый на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
3	Повышенного	Не проявляется	Чернозем типичный слабогумусированный сверхмощный глинистый на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
4	Очень низкого	Естественное переуплотнение	Черноземно-луговая глубокослитизированная мощная малогумусная глинистая на видоизмененных лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic, Stagnic, Bathyvertic)

Таблица 4. Продолжение

№	Зона плодородия	Фактор деградации	Почва	WRB
Поле Г (39°35'10.140" Е, 45°17'45.360" N)				
1	Пониженного	Эрозия	Чернозем обыкновенный малогумусный сверхмощный слабосмытый глинистый на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
2	Нормального	Не проявляется	Чернозем типичный слабогумусированный сверхмощный глинистый на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
3	Повышенного	Не проявляется	Чернозем типичный слабогумусированный сверхмощный глинистый на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
4	Пониженного	Антропогенное переуплотнение	Луговато-черноземная выщелоченная уплотненная малогумусная сверхмощная глинистая на лёссовидных глинах	Luvic Stagnic Chernic Phaeozem (Clayic, Aric, Densic, Pachic)
5	Очень низкого	Естественное переуплотнение	Черноземно-луговая глубокослитизированная мощная малогумусная глинистая на видоизмененных лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic, Stagnic, Bathyvertic)
Поле Д (39°32'27.158" Е, 45°16'59.428" N)				
1	Пониженного	Естественное переувлажнение	Лугово-черноземная выщелоченная малогумусная мощная глинистая на лёссовидных глинах	Luvic Stagnic Chernic Phaeozem (Clayic, Aric, Pachic)
2	Пониженного	Антропогенное переуплотнение	Луговато-черноземная выщелоченная уплотненная малогумусная сверхмощная глинистая на лёссовидных глинах	Luvic Stagnic Chernic Phaeozem (Clayic, Aric, Densic, Pachic)
3	Нормального	Не проявляется	Чернозем типичный слабогумусированный сверхмощный глинистый на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
4	Повышенного	Не проявляется	Чернозем типичный слабогумусированный сверхмощный глинистый на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
5	Пониженного	Антропогенное переуплотнение	Луговато-черноземная выщелоченная малогумусная сверхмощная глинистая на лёссовидных глинах	Luvic Stagnic Chernic Phaeozem (Clayic, Aric, Pachic)
Поле Е (48°7'25.860" Е, 51°57'15.960" N)				
1	Пониженного	Эрозия	Чернозем южный карбонатный слабогумусированный маломощный слабосмытый легкосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric)
2	Повышенного	Не проявляется	Чернозем южный слабогумусированный маломощный легкосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric)
3	Нормального	Не проявляется	Чернозем южный слабогумусированный маломощный легкосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric)
4	Пониженного	Эрозия	Луговато-черноземная слабогумусированная среднемощная среднесмытая среднесуглинистая опесчаненная на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic, Stagnic)

Таблица 4. Продолжение

№	Зона плодородия	Фактор деградации	Почва	WRB
5	Пониженного	Эрозия	Луговато-черноземная слабогумусированная среднесмытая супесчаная на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Arenic, Aric, Pachic, Stagnic)
6	Повышенного	Не проявляется	Луговато-черноземная малогумусная среднесуглинистая на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic, Stagnic)
Поле Ж (45°15'58.440" Е, 51°44'29.670" N)				
1	Пониженного	Эрозия	Чернозем обыкновенный остаточно-карбонатный слабогумусированный среднесмытый легкосуглинистый каменистый на плотных породах	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
2	Повышенного	Не проявляется	Чернозем обыкновенный остаточно-карбонатный слабогумусированный среднесмытый легкосуглинистый опесчаненный на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
3	Пониженного	Эрозия	Чернозем обыкновенный остаточно-карбонатный слабогумусированный среднесмытый легкосуглинистый каменистый на плотных породах	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
4	Нормального	Не проявляется	Чернозем обыкновенный остаточно-карбонатный слабогумусированный среднесмытый легкосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
Поле З (41°33'36.324" Е, 45°25'24.132" N)				
1	Пониженного	Эрозия	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный среднесмытый тяжелосуглинистый на делювиальных отложениях	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
2	Повышенного	Не проявляется	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный мощный легкоглинистый на делювиальных отложениях	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
3	Повышенного	Не проявляется	Лугово-черноземная малогумусная мощная легкоглинистая на делювиальных отложениях	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic, Stagnic)
4	Нормального	Не проявляется	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный мощный легкоглинистый на делювиальных отложениях	Haplic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)
5	Пониженного	Эрозия	Чернозем обыкновенный карбонатный слабогумусированный среднесмытый тяжелосуглинистый на делювиальных отложениях	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
Поле И (41°9'34.898" Е, 52°25'38.478" N)				
1	Пониженного	Не проявляется	Лугово-черноземная обычная среднегумусная мощная тяжелосуглинистая на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic, Stagnic)
2	Нормального	Не проявляется	Луговато-черноземная обычная среднегумусная мощная тяжелосуглинистая на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic, Stagnic)

Таблица 4. Окончание

№	Зона плодородия	Фактор деградации	Почва	WRB
3	Повышенного	Не проявляется	Луговато-черноземная обычная среднегумусная мощная тяжелосуглинистая на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic, Stagnic)
4	Пониженного	Поверхностное переувлажнение	Лугово-черноземная выщелоченная среднегумусная мощная тяжелосуглинистая на лёссовидных глинах	Luvic Stagnic Chernic Phaeozem (Loamic, Aric, Pachic)
5	Пониженного	Поверхностное переувлажнение	Черноземно-луговая омергелеванная среднегумусная мощная тяжелосуглинистая на лёссовидных глинах	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic, Stagnic)
Поле К (40°48'56.952" Е, 44°58'9.984" N)				
1	Повышенного	Не проявляется	Чернозем типичный сверхмощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
2	Пониженного	Не проявляется	Чернозем типичный сверхмощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
3	Нормального	Не проявляется	Чернозем типичный сверхмощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
4	Нормального	Не проявляется	Чернозем типичный сверхмощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
5	Повышенного	Не проявляется	Чернозем типичный сверхмощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)
6	Пониженного	Не проявляется	Чернозем типичный сверхмощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках	Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)

Классификация зон пониженного плодородия по факторам деградации. Сельскохозяйственное поле можно сгруппировать в 3 зоны плодородия (пониженного, нормального и повышенного) примерно равной площади (рис. 4). Зона очень низкого плодородия, если она выделяется, является частью зоны пониженного плодородия. Наличие деградации легче всего предположить в зоне пониженного плодородия. Даже если в зонах нормального и повышенного плодородия существуют изменения в почвенном покрове, то эти изменения нужно относить к проградации почвенного покрова. Тема данной статьи относится только к выделению деградированных участков.

Зоны пониженного плодородия крайне редко располагаются на равнинных участках пашни. Обычно деградированные земли приурочены к определенным типам элементов рельефа: к верхней части водораздела, склонам, потяжинам, западинам и др. Расположение почвенного покрова на тех или иных элементах рельефа еще не означает развития того или иного вида деградации. При правильной обработке склона на нем не будет развиваться эрозия. В условиях юга России на черноземах эрозия приурочена к склонам южной экспозиции при равных уклонах со склонами северной экспозиции. Дефляция может быть оста-

новлена культивированием лесополос. Таким образом, в одних и тех же условиях деградация может происходить или не происходить. Следовательно, карта устойчивой внутриверхневой неоднородности является индикатором фактического проявления деградации в виде снижения почвенного плодородия.

С другой стороны, части поля, приуроченные к элементам рельефа, могут иметь пониженное плодородие в силу естественных причин. На юге России распространены слитые почвы, которые имеют большую плотность и более тяжелый гранулометрический состав по сравнению с окружающими черноземами [17, 25]. В силу физических свойств плодородие слитых почв является пониженным. Но аналогичные физические свойства формируются и при антропогенном уплотнении сельскохозяйственной техникой. Антропогенно-уплотненные почвы также имеют пониженное плодородие. Наиболее возвышенные участки поля часто испытывают недостаток увлажнения, что снижает биологическую продуктивность. Дефляция также чаще всего проявляется на наиболее возвышенных фрагментах поля и также уменьшает биологическую продуктивность. Сочетание элементов рельефа и зон пониженного плодородия позволяет выделить парные группы почв с есте-

Таблица 5. Коэффициенты мультिवременной линии почв для чернозема типичного слабогумусированного сверхмощного

Почвы	C	$X - Y$
Слитизированные	0.125–0.135	–0.019...–0.014
Переуплотненные/влажные	0.135–0.145	–0.021...–0.017
Нормальные (зональные)	0.145–0.155	–0.023...–0.019
Слабоэродированные/дефлированные	0.155–0.165	–0.025...–0.021
Эродированные	0.165–0.185	–0.035...–0.023

Примечание. C – расстояние от центра отрезка мультिवременной линии почвы до начала координат спектрального пространства RED-NIR, $X - Y$ – разница значений координат X и Y спектрального пространства RED-NIR.

ственным пониженным плодородием и уменьшением плодородия, вызванным деградацией (рис. 2).

Отделить деградированные почвы от естественно низко плодородных можно на основе изучения среднемноголетней спектральной яркости. Для этого строится мультिवременная линия почв по технологии спектральной окрестности линии почв [14]. Иссущенные земли водоразделов имеют спектральную яркость отличную от дефлированных почв. В свою очередь слитые почвы и зональные уплотненные почвы имеют разные спектральные характеристики.

В табл. 5 представлены величины двух коэффициентов мультिवременной линии почв [8]. Коэффициенты мультिवременной линии почв вычисляются в рамках технологии спектральной окрестности линии почвы [14] при грамотном выделении открытой поверхности почвы [7]. Коэффициенты мультिवременной линии почв позволяют разделить типы и подтипы почв [8] в зональном ряду почв, не нарушенных деградацией. Процессы деградации нарушают спектральные характеристики зональных почв. В отличие от работ по разделению типов и подтипов зональных почв, в настоящем исследовании коэффициенты мультिवременной линии почв используются для выделения деградированных участков полей в рамках одного подтипа или даже в границах одного поля. Табл. 5 дана для черноземов предкавказских мощных малогумусных (чернозем типичный слабогумусированный сверхмощный).

Рассмотрим поля А и Б рис. 5. В зоне пониженного плодородия находятся почвы с разными коэффициентами мультिवременной линии почв. Одна часть зоны пониженного плодородия имеет спектральные характеристики, идентичные недеградированным почвам как в зонах нормального, так и повышенного плодородия. Другая часть зоны пониженного плодородия имеет спектральные характеристики эродированных земель. Таким образом, можно разделить зону иссушения и зону дефляции.

На полях В и Г рис. 5 зоны пониженного плодородия также имеют разные коэффициенты мульти-

временной линии почв. Области распространения слитизированных почв имеют крайние значения коэффициентов мультिवременной линии почв, а переуплотненные почвы – переходные значения к недеградированным почвам, что позволяет отделить области распространения слитизированных почв от областей деградации.

Общая схема разделения зон пониженного плодородия по формам рельефа, результатам ретроспективного мониторинга и спектральным характеристикам открытой поверхности почв представлена блок-схемой рис. 2. Карты факторов, снижающих плодородие почв, приведены на рис. 5.

Верификация выделенных деградированных участков пашни. Почвенные разрезы закладывали по зонам плодородия для идентификации приуроченности зон к тем или иным почвенным разностям (рис. 4, 5). Список разрезов, номенклатура почв и причины, формирующие зоны пониженного плодородия, охватывающие все варианты блок-схемы рис. 2, представлены в табл. 4. В ходе данного исследования в среднем закладывали 3–4 разреза на поле.

В 83% случаев почвенная номенклатура содержит факторы деградации, аналогичные факторам, определенным по алгоритмам блок-схемы рис. 2. Если считать, что 4% зон пониженного плодородия могут быть дешифрированы ошибочно, то в 13% случаев при почвенных обследованиях номенклатура почв не позволяет идентифицировать причины формирования зон пониженного плодородия. В этих случаях особенно важно провести наземные измерения урожайности и подтвердить правильность выделения зон плодородия. Практически в 13% случаев фактор деградации указывается по алгоритмам блок-схемы рис. 2, а не почвенному обследованию. Это происходит в связи с необходимостью выдачи рекомендаций для точного земледелия. Следовательно, в 13% случаев наблюдаются зоны пониженного плодородия, причины формирования которых не удастся идентифицировать при полевых исследованиях.

В рамках дальнейших работ по наземной верификации необходимо действовать в рамках концеп-

ции следования за данными (Data-driven geography). Необходимо модифицировать традиционные методы почвенных изысканий для установления физических причин формирования зон пониженного плодородия.

Наземная верификация позволяет утверждать, что методы обработки больших данных, примененные в настоящей работе, пригодны для построения карт фактического проявления процессов деградации почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для почвоведов-картографов и сельскохозяйственных производителей появились новые методы детектирования расположения деградированных земель. Точность детектирования достаточна для применения результатов работ в системах точного земледелия. Методы основаны на анализе больших спутниковых данных, технологии спектральной окрестности почв, ретроспективном мониторинге почвенно-земельного покрова и анализе ландшафта. Методы собраны в две технологические цепочки, которые позволяют автоматизировать процесс расчетов. В технологии использованы большие спутниковые данные из открытых источников. Карта устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв является результатом технологий обработки больших спутниковых данных и новым источником информации о почвенно-земельном покрове.

Карты устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв служат основой для классификации почвенного покрова по типам процессов деградации. Карты внутриполевой неоднородности созданы для точного земледелия и в рамках концепции точного земледелия. Карты задают новый вектор почвенных исследований. Реализуется концепция географических исследований, обусловленных данными, когда почвовед при наземных изысканиях исследует результаты обработки больших данных автоматизированными методами. При таком подходе резко увеличивается эффективность детектирования неоднородности почвенного покрова и областей распространения деградированных земель.

В ходе исследования построены карты деградированных земель на площади более 100 тыс. га в восьми регионах России. Проведена наземная верификация построенных карт. Верифицирован уровень плодородия, выделенных зон деградации, и факторы деградации. Точность детектирования зон пониженного плодородия составила 96%, а факторов деградации 83–96%.

Дистанционное зондирование в виде больших данных дистанционного зондирования обладает высокой информативностью для детектирования деградированных участков пашни.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. 1S. Расположение регионов исследования (1 – Краснодарский край, 2 – Липецкая область, 3 – Ростовская область, 4 – Самарская область, 5 – Саратовская область, 6 – Ставропольский край, 7 – Тамбовская область, 8 – Ульяновская область), точками показано расположение тестовых хозяйств.

Рис. 2S. Зависимость урожайности озимой пшеницы от различных доз удобрений по зонам плодородия (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власенко В.П.* Развитие гидроморфизма в почвах западных агроландшафтов западного Предкавказья // Почвоведение. 2009. № 5. С. 532–539.
2. *Волкова Н.А.* Крупномасштабное картографирование растительности очагов современного гидроморфизма в агроландшафтах Ростовской области для целей мониторинга // Геоботаническое картографирование / Отв. ред. Т.К. Юрковская и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. С. 131–140.
3. *Герасимова М.И., Каравеева Н.А., Таргульян В.О.* Деградация почв: методология и возможности картографирования // Почвоведение. 2000. № 3. С. 358–365.
4. *Глазунов Г.П., Гендугов В.М.* Модель крупномасштабного явления ветровой эрозии почв и ее верификация // Почвоведение. 2003. № 2. С. 228–239.
5. *Зайдельман Ф.Р.* Глееобразование как фактор почвообразования и деградации почв, способы их защиты // Почвоведение. 2017. № 7. С. 849–859.
6. *Зайдельман Ф.Р.* Деградация почв как результат антропогенной трансформации их водного режима и защитные мероприятия // Почвоведение. 2009. № 1. С. 93–105.
7. *Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С.* Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1435–1446.
8. *Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С.* Характеристика почвенных типов и подтипов в N-мерном пространстве коэффициентов мультимедийной (эмпирической) линии почв // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1085–1098.
9. *Крупеников И.А.* Типизация антропогенных процессов деградации черноземов // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1509–1017.
10. *Куляница А.Л., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Королева П.В., Рухович Д.И., Симакова М.С.* Применение кусочно-линейной аппроксимации спектральной окрестности линии почв для анализа качества нор-

- мализации материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2017. № 4. С. 401–410.
11. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Краснов С.Ф., Лю Б.Ю. Новое уравнение фактора рельефа для статистических моделей водной эрозии // Почвоведение. 2003. № 10. С. 1239–1247.
 12. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Потенциальные эрозийные потери почвы на пахотных землях Европейской части России // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512.
 13. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования / Под ред. Т.А. Ищенко. М.: Колос, 1973. 95 с.
 14. Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В. Информативность коэффициентов а и b линии почв для анализа материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2016. № 8. С. 903–917.
 15. Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В. Построение карт усредненных спектральных отклонений от линии почв и их сравнение с традиционными почвенными картами // Почвоведение. 2016. № 7. С. 794–812.
 16. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Калинина Н.В., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Влияние лесополос на фрагментацию овражно-балочной сети и образование мочаров // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1043–1045.
 17. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Ретроспективный анализ изменчивости землепользования на слитых почвах замкнутых западин Приазовья // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1168–1194.
 18. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Методология сравнения разновременных почвенных карт в целях выявления и описания динамики почвенного покрова на примере мониторинга засоления почв // Почвоведение. 2016. № 2. С. 164–181.
 19. Сорокина Н.П., Козлов Д.Н. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.
 20. Стасюк Н.В., Добрынин Д.В. Оценка динамики опустынивания почвенного покрова низменных территорий Дагестана с использованием космических снимков // Почвоведение. 2013. № 7. С. 778–787.
 21. Сухановский Ю.П. Модель дождевой эрозии почв // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1114–1125.
 22. Трофимова Т.А., Коржов С.И., Гулевский В.А., Образцов В.Н. Оценка степени физической деградации и пригодности черноземов к минимизации основной обработки почвы // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1125–1131.
 23. Флоринский И.В. Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематических GPS-съемок и почвенных наземных съемок) // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 56–65.
 24. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 236 с.
 25. Хитров Н.Б., Власенко В.П., Рухович Д.И., Брызжев А.В., Калинина Н.В., Роговнева Л.В. География вертисолов и вертиковых почв кубано-приазовской низменности // Почвоведение. 2015. № 7. С. 771–788.
 26. Черноусенко Г.И., Калинина Н.В., Рухович Д.И., Королева П.В. Цифровая карта засоления почв Хакасии // Почвоведение. 2012. № 11. С. 1131–1146.
 27. Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.И., Борисочкина Т.И. Засоление и загрязнение почв тяжелыми металлами в юго-западном округе Москвы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2000. № 1. С. 21–24.
 28. Big Data in Agriculture (Intel) // <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/big-data/lessons-from-the-field.html>
 29. Big Data Science for Precision Farming Business // https://semanticcommunity.info/Data_Science/Big_Data_Science_for_Precision_Farming_Business
 30. Cox M., Ellsworth D. Application-controlled demand paging for out-of-core visualization. Proceedings of the 8th conference on Visualization '97 (VIS '97), Phoenix AZ, USA, October 1997. IEEE Computer Society Press: Los Alamitos, CA, USA. P. 235–244.
 31. Farifteh J., van der Meer F., Atzberger C., Carranza E. Quantitative Analysis of Salt-Affected Soil Reflectance Spectra: A Comparison of Two Adaptive Methods (PLSR and ANN) // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 110(1). P. 59–78.
 32. Farm Management. 2018. Satellite Big Data: How It Is Changing the Face of Precision Farming // <http://www.farmmanagement.pro/satellite-big-data-how-it-is-changing-the-face-of-precision-farming/>
 33. Higginbottom T.P., Symeonakis E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 9552–9575.
 34. Huang Y., Chen Z.-X., Yu T., Huang X.-Z., Gu X.-F. Agricultural remote sensing big data: Management and applications // J. Integrative Agriculture. 2018. V. 17(9). P. 1915–1931.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61859-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61859-8)
 35. Ibrahim Y.Z., Balzter H., Kaduk J., Tucker C.J. Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012 // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 5471–5494.
 36. Kamilaris A., Kartakoullis A., Prenafeta-Boldú F. X. A review on the practice of big data analysis in agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. V. 143. P. 23–37.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>
 37. Kauth R.J., Thomas G.S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT // Proceedings of the Symposium on machine processing of remotely sensed data, Purdue University, West Lafayette, Ind., June 29–July 1, 1976. N.Y., 1976. P. 4B-41–4B-51.
 38. Khitrov N.B., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Trubnikov A.V., Petukhov D.A., Kulyanitsa A.L. A study of the responsiveness of crops to fertilizers by zones of stable intra-field heterogeneity based on big satellite data analysis // Archives of Agronomy and Soil Science. 2019.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1703957>

39. Krenz J., Greenwood P., Kuhn N.J. Soil Degradation Mapping in Drylands Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Data // *Soil Systems*. 2019. V. 3. P. 33:1–33:19.
40. Kwan M.-P. Algorithmic Geographies: Big Data, Algorithmic Uncertainty, and the Production of Geographic Knowledge // *Annals of the American Association of Geographers*. 2016. V. 106(2). P. 274–282.
41. McCarty J.L., Ellicott E.A., Romanenkov V., Rukhovitch D., Koroleva P. Multi-year black carbon emissions from cropland burning in the Russian Federation // *Atmospheric Environment*. 2012. V. 63. P. 223–238.
42. Mendonca-Santos M.L., Dart R.O., Santos H.G., Coelho M.R., Barbara R.L.L., Lumberras J.F. Digital Soil Mapping of Topsoil Organic Carbon Content of Rio de Janeiro State, Brazil // *Digital Soil Mapping* / Eds.: J.L. Boettinger et al. N.Y.: Springer Science + Business Media B.V., 2010. P. 255–266.
43. Miller H.J., Goodchild M.F. Data-driven geography // *GeoJournal*. 2015. V. 80(4). P. 449–461. <https://doi.org/10.1007/s10708-014-9602-6>
44. NEXT Farming: Smarte Lösungen für Landwirte // <https://www.nextfarming.de/>.
45. Openshaw S. Geographical data mining: key design issues // *Proceedings of the 4th International Conference on GeoComputation*, Fredericksburg, Virginia, USA, 25–28 July 1999. http://www.geocomputation.org/1999/051/gc_051.htm
46. Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovitch D.I., Romanenko I.A. Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: Estimates from the “model of humus balance” // *Regional Environmental Change*. 2007. V. 7(2). P. 93–104.
47. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // *Proceedings of Third ERTS Symposium*, Washington, DC, USA, 10–14 December 1973 (NASA SP-351). 1974. V. 1. P. 309–317. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>
48. Rukhovitch A.D., Vilchevskaya E.V., Kalinina N.V., Petukhov D.A., Rukhovitch D.I. Comparative analysis of the informativeness of the vegetation indices and measurements of crop yields in the system of precision farming // *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019: conference proceedings*, Albena, Bulgaria, 30 June–6 July, 2019. Sofia, 2019. V. 19. P. 501–508. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.2/S10.061>
49. Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Vilchevskaya E.V., Kolesnikova L.G., Romanenkov V.A. Constructing a spatially-resolved database for modelling soil organic carbon stocks of croplands in European Russia // *Regional Environmental Change*. 2007. V. 7(2). P. 51–61.
50. Shapovalov D.A., Fedorenko V.F., Trubnikov A.V., Koroleva P.V., Rukhovitch D.I. Maps of stable intra-field heterogeneity based on big satellite data in the precision farming system // *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019: conference proceedings*, Albena, Bulgaria, 30 June–6 July, 2019. Sofia, 2019. V. 19. P. 903–908. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.2/S11.111>
51. Shary P., Sharaya L., Mitusov A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. P. 1–32.
52. SRTM <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

Detecting Degraded Arable Land on the Basis of Remote Sensing Big Data Analysis

D. I. Rukhovitch¹*, P. V. Koroleva¹, N. V. Kalinina¹, E. V. Vil'chevskaya¹,
G. A. Suleiman¹, and G. I. Chernousenko¹

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: landmap@yandex.ru

The recent development of precision farming technologies has necessitated the creation of the maps of stable intra-field heterogeneity of soil fertility on the basis of the analysis of big remote sensing data. To create such maps, thousands of satellite images for 35 years have been analyzed for each element of the earth surface to identify the areas of reduced fertility. Such areas are indicative of negative soil properties. Some of the negative properties are of the initial natural origin, and others are developed as a result of degradation processes. It is possible to separate the zones of reduced fertility because of the natural factors from those developed due to anthropogenic impacts on the basis of the analysis of morphometric parameters of surface topography coupled with technology of the spectral neighborhood of soil line. A combination of various methods of the analysis of big remote sensing data and landscape parameters has made it possible to create the maps of degraded lands with an accuracy sufficient for precision farming technologies. This study presents the results of identification of three natural and four anthropogenic factors of fertility decline on arable land. The areas of the action of particular degradation factors identified from remote sensing data have been verified by the ground soil survey. The attained results are the direct consequence of the development of remote sensing big data analysis. Both a soil cartographer and a farmer have now received a new method for detecting the areas of the spread of degradation factors.

Keywords: remote sensing big data, stable intra-field heterogeneity of soil fertility, soil degradation, spectral neighborhood of the soil line, GIS