

ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К УСТАНОВЛЕНИЮ УРОВНЕЙ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ (НА ПРИМЕРЕ ХОЗЯЙСТВА)

Роман Николаевич Ушаков, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Анастасия Владимировна Ручкина, старший преподаватель

Виктор Иванович Левин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Татьяна Юрьевна Ушакова, кандидат сельскохозяйственных наук

Федор Юрьевич Бобраков, аспирант

Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, Россия

E-mail: r.ushakov1971@mail.ru

Аннотация. С помощью агрохимического мониторинга элементарных участков полей возможно более детально изучить почвенное плодородие. Например, методами кластерного и дискриминантного анализа выявить разные уровни плодородия агропочв. При этом необходимо соблюдать критерии группировки по плодородию. 1. Невысокая пространственная контрастность агрохимических свойств. Если она присутствует (проверяется показателями асимметрии и эксцесса), то ее требуется ослабить – привести значения данных в выборке к нормальному распределению или близкому к нему. Иначе информация по некоторым показателям может оказаться завуалированной крайне высокими другими значениями. 2. Достоверное участие всех регистрируемых почвенных показателей при выделении нескольких групп участков со схожими характеристиками (кластерный анализ). 3. Равноценный (по лямбде-Уилкса) и достоверный вклад (уровню значимости) показателей при установлении плодородия. Можно определить доли участков с разными классами обеспеченности элементами питания или степенями кислотности. Исследования выполнены по данным агрохимического мониторинга почвенных показателей чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого гранулометрического состава в АО «имени Генерала Скобелева» (Рязанская область). Определяли обменную кислотность, подвижные формы фосфора, калия и гумус общедоступными методами. Выделены два варианта плодородия – условно уровень № 1 и № 2. По № 2 кислотность чернозема выщелоченного смещена в большей степени в слабокислую область по сравнению с № 1. Значения по подвижному фосфору соответствуют среднему – 72–92 мг/кг (уровень № 1) и повышенному – 103–122 мг/кг (№2) классам обеспеченности, подвижному калию – повышенному. Для уровня № 2 значения были выше (145–167 мг/кг) по сравнению с № 1 (114–138 мг/кг). Аналогичный характер различий наблюдали и по гумусу. Информация о плодородии чернозема выщелоченного, характерная для уровня № 1, может служить ориентиром для почвы элементарных участков с наихудшими характеристиками.

Ключевые слова: уровни плодородия, обменная кислотность, подвижный калий, подвижный фосфор, гумус, кластерный анализ, дискриминантный анализ, чернозем выщелоченный

JUSTIFICATION OF THE APPROACH TO ESTABLISHING LEVELS OF SOIL FERTILITY (ON THE EXAMPLE OF A FARM)

R.N. Ushakov, *Grand PhD in Agricultural Sciences, Professor*

A.V. Ruchkina, *Senior Lecturer*

V.I. Levin, *Grand PhD in Agricultural sciences, Professor*

T.Yu. Ushakova, *PhD in Agricultural Sciences*

F.Yu. Bobrakov, *PhD Student*

Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostycheva, Ryazan, Russia

E-mail: r.ushakov1971@mail.ru

Abstract. The information of agrochemical monitoring of elementary sections of fields allows us to study soil fertility in more detail. For example, using cluster and discriminant analysis methods to identify different levels of agricultural soil fertility. At the same time, it is necessary to comply with the criteria of grouping by fertility. 1. Low spatial contrast of agrochemical properties. If it is present (checked by indicators of asymmetry and kurtosis), then it must be weakened – to bring the data values in the sample to a normal distribution or close to it. Otherwise, information on some indicators may be veiled by extremely high values of others. 2. Reliable participation of all registered soil indicators in the allocation of several groups of sites with similar characteristics (cluster analysis). 3. Equivalent (according to Lambda-Wilkes) and reliable contribution (in terms of significance) of indicators in the allocation of fertility levels. At the same time, it is possible to determine the proportion of sites with different classes of availability of batteries or degrees of acidity. The research was carried out on the basis of data from agrochemical monitoring of soil indicators of leached chernozem of heavy loamy granulometric composition in JSC “General Skobelev”, Ryazan region. Salt acidity, mobile forms of phosphorus and potassium, humus were determined by publicly available methods. Two fertility options have been established – conditionally level No. 1 and No. 2. According to level 2, the acidity of leached chernozem is shifted to a greater extent to a slightly acidic region compared to level No. 1. The ranges of values for mobile phosphorus correspond to the average – 72–92 mg/kg (level No. 1) and elevated – 103–122 mg/kg (level No. 2) security classes, for mobile potassium – an elevated class. However, for level No. 2, the values were higher (145–167 mg/kg) compared to level No. 1 (114–138 mg/kg). A similar nature of differences was observed in humus. We believe that the information on the fertility of leached chernozem, characteristic of level No. 1, can serve as a guide for the soil of elementary areas with the worst characteristics.

Keywords: fertility levels, exchange acidity, mobile potassium, mobile phosphorus, humus, cluster analysis, discriminant analysis, leached chernozem

Пространственная агрохимическая неоднородность почвы в границах классификационных выделов уровня подтипа, если только она несильно (но неизбежно) обусловлена гранулометрическим составом материнской породы и рельефом — следствие возделывания сельскохозяйственных культур, применения агротехнических средств. Одинаковые агрохимические показатели почвенных контуров одного поля контрастируют между собой в той или иной степени. Производственные участки могут служить научным полигоном для детального изучения плодородия. Не менее важно решение некоторых прикладных задач, связанных с внедрением систем точного земледелия. [5, 6] Не исключение — адаптивно-ландшафтные системы земледелия.

Пространственный учет показателей плодородия находит свое отражение в нормативных и рекомендательных документах для почвенного мониторинга. [3] Детальное изучение плодородия подразумевает не только математический расчет средних значений каждого показателя и их локацию в пространстве. Почвенные свойства необходимо представлять как единое целое. Это позволит реализовать принципы комплексной оценки почвенного плодородия, добавить к существующим классическим методам [4, 10] другие способы, ориентированные на выявление уровней плодородия в соответствии с зонально-провинциальными нормативами. [9] Мониторинг, анализ и оценка каждого показателя плодородия и их совокупности в целом по контурам, элементарным участкам требует дополнительных и более сложных статистических методов обработки информации (кластерный и дискриминантный анализы), которые широко применяют в исследованиях агрообъектов. [2, 12, 14, 15] В нашем случае кластерный анализ (предварительный этап) необходим для разбивки общего массива данных почвенных свойств на группы со схожими значениями. Далее на основе группировки проводят дискриминантный анализ. Если вклад какого-либо показателя в дискриминацию оказывается недостаточным, то на фоне относительно высокой вариации этого показателя (проверяется расчетом коэффициента вариации) указывают на плохие комбинации между почвенными свойствами. Например, когда внутри группы большой процент случаев с высоким содержанием подвижного калия и низким гумуса.

Элементарные участки предоставляют объем выборки, достаточный для получения развернутой информации о плодородии. Определить не только характер его пространственной вариабельности с нахождением уровней плодородия, но и выявить проблемные участки в условиях агровоздействия на почву, проверить на наличие одного их важных принципов проявления плодородия — взаимосвязь его параметров, комплексности. [3]

Цель работы — установить для выщелоченного чернозема производственных участков хозяйства уровни плодородия при условии проявления им комплексности. Под комплексностью плодородия мы понимаем уникальную сущность по формированию (организации) между почвенными показателями структурного единства целно направленных связей, сочетаний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены на основе данных агрохимического мониторинга почвенных показателей чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого в АО «имени Генерала Скобелева» (Рязанская область). Определяли обменную кислотность ($pH_{\text{ккл}}$), подвижный фосфор (P_2O_5), подвижный калий (K_2O) и гумус. Объем выборки включал 104 наблюдения с различными комбинациями почвенных показателей. Почву анализировали в смешанных образцах по общепринятым методам: гумус — по Тюрину (ГОСТ 26213-91), подвижный фосфор и калий — по Кирсанову (ГОСТ 26207-91), обменная кислотность — потенциометрически.

Статистические анализы выполнены с помощью программного продукта STATISTICA10. Многомерному статистическому анализу предшествовала проверка на соответствие законам распределения эмпирических данных; значения $pH_{\text{ккл}}$ — нормальное распределение, P_2O_5 — логнормальное. По K_2O и гумусу, определив значимые «выбросы» по графикам распределения эмпирических значений к ожидаемым нормально распределенным, была построена категориальная гистограмма случайных величин с исключением «выбросов». Проверку гипотезы на нормальное распределение проводили с помощью критерия Шапиро-Уилкса.

Кластерный анализ (метод к-средних) позволяет: выделить группы (в нашем случае их было две) с разными уровнями почвенного плодородия и оценить его степень пространственной дифференциации. Для проверки эффективности результатов кластеризации — выявления и по возможности устранения неправильных классификаций, определения вклада почвенных свойств использовали дискриминантный анализ. Принимали условие, что только участие всех почвенных показателей в дискриминации может служить признаком качественной классификации и проверки на комплексность плодородия. Дискриминантный анализ позволил скорректировать исходный массив данных таким образом, чтобы затем на основе корреляций почвенных показателей и их групповой принадлежности найти максимальные удачные соотношения между ними.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены статистические данные: широкий диапазон значений P_2O_5 и K_2O между минимальными (X_{min}) и максимальными значениями (X_{max}): 39...279 и 67...558 мг/кг соответственно (вариация этих показателей высокая — 44%).

Медиана — параметр, который в отличие от среднего значения, устойчив к «выбросам», поэтому при нормальном распределении значения медианы и среднего значения совпадают. По элементам питания отмеченные показатели разнятся: по P_2O_5 на 11 мг/кг, K_2O — 14 мг/кг. На наличие большой доли экстремально больших отклонений от среднего указывают асимметрия (As) и эксцесс (E). As значительно превысила порог в 0,5 ед., при котором она расценивается как высокая: P_2O_5 — 1,4, K_2O — 2,4 ед. Избыточный эксцесс для K_2O (10,2 ед.) свидетельствует

о крайней неоднородности почвы по этому элементу, связанной с наличием элементарных участков с очень высоким его содержанием. Это послужило основанием для корректировок, так как вероятно, что за высокими значениями одного показателя вклады других могут оказаться завуалированными.

Следующий этап работы — классификация почвенных показателей, нахождение оптимального варианта их групповой систематизации.

Кластеризация исходных данных по почвенным показателям (на две группы) в том виде, в котором они были представлены до проверки на нормальное распределение, показала плохой результат. Достоверные различия между кластерами (группы) проявились по P_2O_5 и K_2O , pH_{KCl} и гумусу — отсутствовали (табл. 2).

Формирование почвенного плодородия предполагает в максимальной степени приближенное участие всех учитываемых почвенных показателей. На практике часто результатом агрохимического мониторинга становится весьма вариабельный массив данных почвенных свойств, указывающий на пространственную неоднородность. Если при кластеризации, используемый в обработке агрохимических данных как метода классификации, а не сжатия информации, обнаруживается при сравнении кластеров недостоверное участие хотя бы одного признака, массив информации о плодородии можно считать неудачным. С научной точки зрения для понимания комплексности плодородия, равнозначного влияния почвенных свойств необходимо проводить коррекцию. Частично она осуществляется самой процедурой кластеризации (разделение на гомогенные группы).

После корректировки массива данных (удаление «хвостов») участие почвенных показателей (признаки) стало достоверным. Во второй группе, по сравнению с первой, значение pH_{KCl} было достоверно выше на 0,3 ед pH , P_2O_5 и K_2O — 30 мг/кг, гумуса — 0,3% (табл. 3). С 95%-й уверенностью в таблице 3 представлены доверительные интервалы (–95% +95%).

Следует признать, что если кластерный анализ обнаруживает различающиеся между собой группы, то это означает, что почвенные свойства характеризуются пестротой, дифференцированы в пространстве. При оценке плодородия почвы это плохой признак, но встречается очень часто. Кластерный анализ позволяет вычленив группу с почвенными свойствами, характеризующими наихудший вариант модели плодородия для хозяйства. Например, на долю кластера 1 с указанными в таблице 2 не самыми оптимальными числовыми значениями приходится 22%, что много. Чтобы кластеры объединились, необходимо привести в числовое соответствие показатели кластера 1 и кластера 2, как ориентира. Практически реализовать это в элементарных участках полей несложно.

Проведенная кластеризация разбила массив данных на две группы, которые отличаются уровнем плодородия. Их можно использовать для включения в ранжированные модели плодородия выщелоченного чернозема применительно к конкретным условиям хозяйства. Результаты кластерного анализа — предварительная процедура с общими наметками для успешного решения задач, которые ставятся перед дискриминантным анализом.

Кластерный анализ не дает четких критериев оценки качества классификации и результаты могут быть неоднозначными. По данным дискриминантного анализа оценивается для отдельных лет варьирование доли влияния и уровня значимости факторов и их взаимодействий: чем меньше варьирование, тем устойчивее влияние изучаемых факторов. [10]

Наша задача применения дискриминантного анализа состоит в поиске такой структуры модели плодородия, выровненной по его показателям, при которой неизбежное разделение на группы минимизируется. В нашем случае дискриминантный анализ исходного (до корректировки) массива данных не установил отношения к дискриминации pH_{KCl} и гумуса (табл. 4). Их исключение из обработки не привело к существенному увеличению лямбды Уилкса (0,37), не ухудшило результат, значит, эти переменные не вносили важный вклад (чем выше значение лямбды Уилкса, тем важнее этот признак). После добавления pH_{KCl} и гумуса лямбда Уилкса достоверно не уменьшилась, поэтому можно сделать вывод об отсутствии их вклада в разделение групп. Если бы по фосфору и калию сложилась аналогичная ситуация, то на этом статистическую обработку можно было бы остановить, так как группы однородные, различия между ними недостоверные. Однако дискриминация проходит по элементам питания.

В таблице 4 показаны результаты для исходного массива данных, которые плохо описывали нормальное распределение по фосфору, калию, гумусу.

Таблица 1.
Общая статистика агрохимических показателей
чернозема выщелоченного

Параметр	X_{cp}	Me	X_{min}	X_{max}	Sx_{cp}	Kv, %	As	E
pH_{KCl}	5,2	5,1	4,6	6,0	0,3	5,4	0,3	0
P_2O_5 , мг/кг	106	95	39	279	46,8	44	1,4	2,6
K_2O , мг/кг	157	143	67	558	69,9	44	2,4	10,2
Гумус, %	6,3	6,2	4,1	8,0	0,6	9,6	–0,3	2,3

Таблица 2.
Дисперсионный анализ при кластеризации

Параметр	Дисперсия		F-критерий Фишера	Уровень значимости (p)
	между кластерами	в пределах кластеров		
pH_{KCl}	0	8	0,05	0,81
P_2O_5 , мг/кг	109172	116324	95	<0,01
K_2O , мг/кг	268169	234438	116	<0,01
Гумус, %	0,1	37	0,21	0,64

Таблица 3.
Краткая описательная статистика кластеров
(лямбда Уилкса=0,57; $p<0,05$)

Показатель	Кластер (группа) 1				Кластер (группа) 2			
	X_{cp}	Sx	–95%	+95%	X_{cp}	Sx	–95%	+95%
pH_{KCl}	5,0	0,04	5,0	5,1	5,3	0,03	5,2	5,3
P_2O_5 , мг/кг	82	5,2	72	92	112	4,8	103	122
K_2O , мг/кг	126	6,0	114	138	156	5,5	145	167
Гумус, %	6,1	0,093	5,9	6,3	6,4	0,086	6,3	6,6

Пришлось выявить и исключить «хвосты» — очень высокие значения показателей, например, по K_2O , низкие значения по гумусу без ущерба потери ценной информации. Не совсем удачной оказалась кластеризация. С учетом выявленных плохих классификаций объектов (наблюдения) изменили наименования кластеров с таким учетом, чтобы в них количество оптимальных соотношений между почвенными свойствами было наибольшим. В противном случае, например, более чем в 15% событий программа отнесла содержание гумуса существенно выше медианного значения в кластер 1, который отличался невысоким содержанием элементов питания. Аналогичные неудачные комбинации встречались в отношении других показателей. Поэтому кластеры скорректировали — принудительно изменили кластер 1 на кластер 2 при превышении количества гумуса медианного значения (6,3%, табл. 1), и массив данных — исключили значения K_2O , превышающие 250 мг/кг. После этого участие почвенных показателей стало достоверным (табл. 4). Увеличилась общая лямбда Уилкса с 0,37 до 0,57, это свидетельствует о снижении контрастности между группами или о приближении к выровненности плодородия. Чем выше значение лямбды Уилкса, тем значимее вклад почвенного показателя. pH_{KCl} со значением лямбды Уилкса 0,73, превышающим остальные показатели, обладает наибольшей дискриминирующей силой, то есть вкладом в разделение общего массива данных на две группы с разными уровнями плодородия. По медианному значению pH (5,1) чернозем выщелоченный имеет слабокислую реакцию почвенного раствора (табл. 1). Одинаковая лямбда Уилкса (0,6...0,63), но наименьший вклад элементов питания и гумуса не могут свидетельствовать об уменьшении межгрупповых различий по этим переменным.

Наибольший множественный коэффициент R (0,94) у гумуса подтверждает его тесную корреляцию со всеми другими переменными в модели при дискриминации, хотя до кластеризации корреляции между гумусом, pH_{KCl} , элементами питания отсутствовали. Отмечены достоверные корреляции между элементами питания, что говорит об их синхронном увеличении из-за применения минеральных удобрений.

Многомерная статистика была использована для того, чтобы на основе доверительных интервалов получить модели с разными по числовым значениям почвенными параметрами вариантов плодородия чернозема выщелоченного.

Доверительные интервалы по исходному массиву данных (вариант 1) в отличие от сгруппированного методом кластеризации (вариант 2) особенно разнились по элементам питания и гумусу. Для варианта 1 интервал значений, в пределах которого с доверительной вероятностью 95% находится истинное среднее содержание P_2O_5 , — 97...115 мг/кг (табл. 5). В этом интервале на долю средней обеспеченности приходится 55%, повышенной — 32%. Кластеризация и проверка на наличие достоверных межгрупповых различий позволяет определить фрагмент почвенного плодородия со значениями ниже средних величин для конкретного результата агрохимического мониторинга. В нашем случае на его долю приходилось 22%. Кластеризация (вариант 2) разделила данные по P_2O_5 на среднюю обеспеченность

(группа 1 — 72...92 мг/кг) и повышенную (группа 2 — 103...122 мг/кг).

Данные по варианту 1 не могут быть использованы при выделении уровней плодородия, так как не был установлен вклад всех почвенных показателей.

В варианте 2 (на основе кластеризации) найдены два уровня плодородия. По условному уровню 2 кислотность чернозема выщелоченного смещена в слабокислую область по сравнению с уровнем 1. Области значений по P_2O_5 соответствуют среднему (72...92 мг/кг) и повышенному (103...122 мг/кг) классам обеспеченности (по Кирсанову), K_2O — повышенному. Для уровня 2 значения были выше (145...167 мг/кг). Аналогичный характер различий наблюдали и по гумусу. Мы полагаем, что информация о плодородии чернозема выщелоченного, характерная для уровня 1, может служить ориентиром для почвы элементарных участков с наихудшими характеристиками.

В большинстве случаев агрохимическое обследование почв затрагивает гумус, кислотность, фосфор и калий (показательные параметры). Гумус, как подсистема почвенного органического вещества, придает ему стабильность и обеспечивает сохранность в почве. [7] С гумусом коррелируют многие показатели. [8] Повышенная кислотность инициирует деграционные процессы в почве. [13] С кислотностью коррелируют емкость катионного обмена, сумма обменных оснований.

Выводы. Результаты агрохимического мониторинга почвенных показателей, проводимого в рамках обследования элементарных участков производственных полей, представляют не только

Таблица 4.
Статистика переменных в дискриминантном анализе

Параметр	Лямбда Уилкса	Частная лямбда	F (критерий)	Уровень значимости	R
исходный массив данных (общая лямбда Уилкс = 0,37)					
вариант 1					
pH_{KCl}	0,38	0,99	1,4	0,23	0,84
P_2O_5 , мг/кг	0,46	0,81	22,7	<0,01	0,76
K_2O , мг/кг	0,48	0,79	27,0	<0,01	0,87
Гумус, %	0,38	0,99	0,6	0,44	0,98
скорректированный кластер и массив данных (общая лямбда Уилкс = 0,57)					
вариант 2					
pH_{KCl}	0,73	0,79	24,2	<0,01	0,87
P_2O_5 , мг/кг	0,60	0,96	3,78	0,05	0,25
K_2O , мг/кг	0,63	0,91	8,49	<0,01	0,71
Гумус, %	0,63	0,91	8,91	<0,01	0,94

Таблица 5.
Уровни плодородия чернозема выщелоченного
(на основе доверительных интервалов)

Параметр	Без группы (вариант 1)		На основе кластеризации (вариант 2)			
			группа/уровень 1		группа/уровень 2	
	–95%	+95%	–95%	+95%	–95%	+95%
pH_{KCl}	5,1	5,2	5,0	5,1	5,2	5,3
P_2O_5 , мг/кг	97	115	72	92	103	122
K_2O , мг/кг	144	171	114	138	145	167
Гумус, %	6,2	6,4	5,9	6,3	6,3	6,6

практический, но и научный интерес для получения обширного и в большинстве случаев вариабельного по объектам и признакам массива данных.

Подход по выделению уровней плодородия включает несколько этапов. На первом (он может и отсутствовать) определяют и при необходимости исключают крайне высокие, необоснованные значения показателей. В нашем случае это было выражено в отношении элементов питания. Необходимость связана с тем, что в противном случае высок риск проявления почвенных показателей с допустимыми для нормального распределения значениями асимметрии и эксцесса недостоверного вклада при кластеризации исходного общего массива данных по плодородию (второй этап). Если в одну группу входят показатели с разнокачественными характеристиками, то правильно интерпретировать результаты группировки в разрезе формирования почвенного плодородия очень сложно, если слабокислая почва обнаруживается в разных кластерах. Выделение уровней плодородия невозможно. На третьем этапе, по результатам кластерного анализа предлагаем проводить дискриминантный анализ. Он позволяет обнаружить плохие комбинации в классификации почвенных свойств. Например, когда высокое содержание элементов питания проявляется на фоне низкого для конкретной почвы содержания гумуса.

На четвертом этапе рассчитывают доверительные интервалы по регистрируемым показателям. Их можно использовать для выделения уровней плодородия для конкретного хозяйства. Мы не ранжируем уровни плодородия на условно низкий, средний или высокий. Их наличие может указывать на контрастную неоднородность плодородия в пределах поля, которую необходимо сглаживать. Это один из критериев успешной группировки. Другое условие — достоверный вклад всех регистрируемых почвенных показателей при выделении групп или кластеров, определяемых как уровни плодородия почвы, при этом само плодородие представляет единый комплекс, так как его параметры в структурном отношении выстраиваются в единое целое.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Апарин Б.Ф. В книге: Эволюционные модели плодородия почв. С-Пб.: Изд-во Петербургского университета, 1997. С. 183–185.
- Гиниятуллин К.Г., Валеева А.А., Смирнова Е.В. Использование кластерного и дискриминантного анализов для диагностики литологической неоднородности почвообразующей породы по гранулометрическому составу // Почвоведение. 2017. № 8. С. 946–953.
- Державин Л.М., Фрид А.С. О комплексной оценке плодородия пахотных земель // Агрохимия. 2001. № 9. С. 5–12.
- Державин Л.М., Фрид А.С. Научно-методические принципы комплексного мониторинга плодородия земель сельскохозяйственного назначения // Агрохимия. 2012. № 2. С. 3–11.
- Иванов Д.А., Карасева О.В., Рублюк М.В. Мониторинг агрохимических свойств почв различных угодий в пределах агроландшафта // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 1. С. 27–30.
- Княжнева Е.В., Надежкин С.М., Фрид А.С. Оценка плодородия чернозема выщелоченного на производственном участке // Агрохимия. 2005. № 2. С. 5–14.
- Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13.
- Лыков А.М. Гумус и плодородие почвы. М.: Московский рабочий, 1985. С. 65–69.
- Фрид А.С., Кузнецова И.В., Королева И.Е. и др. Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. С. 107–111.
- Фрид А.С. Обоснование методических подходов к анализу данных многолетних полевых опытов // Агрохимия. 2013. № 10. С. 95–96.
- Фрид А.С., Чуян О.Г., Соловиченко В.Д., Тютюнов С.И. Оценка плодородия. В книге: Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. М., 2013. С. 17–34.
- Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И. Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1093–1100.
- Чижикова Н.П. Деградация минеральной основы почв. В книге: Научные основы предотвращения деградации почв (Земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. М., 2013. С. 353–368.
- Якушев В.П., Петрушин А.Ф., Матвеев Д.А. и др. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 2. С. 4–10.
- Mandal U.K., Warrington D.N., Bhardwaj A.K. et al Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis // Geoderma. 2008. V. 144. P. 189–197.

REFERENCES

- Aparin B.F. V knige: Evolyucionnye modeli plodorodiya pochv. S-Pb.: Izd-vo Peterburgskogo universiteta, 1997. S. 183–185.
- Giniyatullin K.G., Valeeva A.A., Smirnova E.V. Ispol'zovanie klasternogo i diskriminantnogo analizov dlya diagnostiki litologicheskoy neodnorodnosti pochvoobrazuyushchej porody po granulometricheskomu sostavu // Pochvovedenie. 2017. № 8. S. 946–953.
- Derzhavin L.M., Frid A.S. O kompleksnoj ocenke plodorodiya pahotnyh zemel' // Agrohimiya. 2001. № 9. S. 5–12.
- Derzhavin L.M., Frid A.S. Nauchno-metodicheskie principy kompleksnogo monitoringa plodorodiya zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya // Agrohimiya. 2012. № 2. S. 3–11.
- Ivanov D.A., Karaseva O.V., Rublyuk M.V. Monitoring agrohimicheskikh svoystv pochv razlichnyh ugodij v predelakh agrolandshafta // Vestnik Rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki. 2020. № 1. S. 27–30.
- Knyazhneva E.V., Nadezhkin S.M., Frid A.S. Ocenka plodorodiya chernozema vyshchelochennogo na proizvodstvennom uchastke // Agrohimiya. 2005. № 2. S. 5–14.
- Kogut B.M., Semenov V.M., Artem'eva Z.S., Danchenko N.N. Degumusirovanie i pochvennaya sekvestraciya ugleroda // Agrohimiya. 2021. № 5. S. 3–13.

8. Lykov A.M. Gumus i plodorodie pochvy. M.: Moskovskij rabochij, 1985. S. 65–69.
9. Frid A.S., Kuznecova I.V., Koroleva I.E. i dr. Zonal'no-provincial'nye normativy izmenenij agrohimicheskikh, fiziko-himicheskikh i fizicheskikh pokazatelej osnovnykh pahotnykh pochv evropejskoj territorii Rossii pri antropogennykh vozdeystviyah. M.: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2010. S. 107–111.
10. Frid A.S. Obosnovanie metodicheskikh podhodov k analizu dannykh mnogoletnih polevykh opytov // Agrohimiya. 2013. № 10. S. 95–96.
11. Frid A.S., Chuyan O.G., Solovichenko V.D., Tyutyunov S.I. Ocenka plodorodiya. V knige: Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradacii pochv (zemel') sel'skohozyajstvennykh ugodij Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ih plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii. M., 2013. S. 17–34.
12. Holodov V.A., Yaroslavceva N.V., Lazarev V.I. Interpretaciya dannykh agregatnogo sostava tipichnykh chernoze-
mov raznogo vida ispol'zovaniya metodami klasternogo analiza i glavnykh component // Pochvovedenie. 2016. № 9. S. 1093–1100.
13. Chizhikova N.P. Degradaciya mineral'noj osnovy pochv. V knige: Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradacii pochv (Zemel') sel'skohozyajstvennykh ugodij Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ih plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii. M., 2013. S. 353–368.
14. Yakushev V.P., Petrushin A.F., Matveenko D.A. i dr. Novyj metod kolichestvennoj ocenki vnutripolevoj izmenchivosti po opticheskim harakteristikam posevov dlya tochnogo zemledeliya // Vestnik rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki. 2020. № 2. S. 4–10.
15. Mandal U.K., Warrington D.N., Bhardwaj A.K. et al Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis // Geoderma. 2008. V. 144. P. 189–197.

Поступила в редакцию 06.10.2022

Принята к публикации 20.10.2022