

ISSN 0136–1694 (Print)
ISSN 2312-4202 (Online)

ФГБНУ «ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА»

БЮЛЛЕТЕНЬ
ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА
имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 113

Москва
2022

<https://bulletin.esoil.ru>

ISSN 0136–1694 (Print)
ISSN 2312-4202 (Online)

V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE

Dokuchaev Soil Bulletin

**(Byulleten Pochvennogo instituta
imeni V.V. Dokuchaeva)**

Volume 113

**Moscow
2022**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
Иванов А. Л., академик РАН

Заместитель главного редактора:
Савин И. Ю., академик РАН

Редакционная коллегия:

А-Ксин Джу (университет Висконсина, США)
Когут Б. М. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)
Монтанарелла Л. (Институт окружающей среды и устойчивого развития Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии, Италия)
Розанов А. Б. (Университет Стелленбош, ЮАР)
Тихонович И. А., академик РАН (Санкт-Петербургский университет, Санкт-Петербург)
Тот Г. (Университет Паннонии, Венгрия)
Хитров Н. Б. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)
Чендев Ю. Г. (Белгородский государственный университет, Белгород)
Швиденко А. З. (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия)
Шишков Т. А. (Институт почвоведения им. Н. Пушкирова, Болгария)

Chief Editor:
A. L. Ivanov, Academician of RAS

Deputy Chief Editor:
I. Yu. Savin, Academician of RAS

Editorial board:

A-Xing Zhu (University of Wisconsin-Madison, USA)
B. M. Kogut (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia)
L. Montanarella (Institute for Environment and Sustainability – European Commission’s Joint Research Centre (IES JRC), Italy)
A. B. Rozanov (Stellenbosh University, Republic of South Africa)
I. A. Tikhonovich, Academician of RAS (Saint Petersburg State University, Russia)
G. Toth (University of Pannonia, Hungary)
N. B. Khitrov (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia)
Yu. G. Chendev (Belgorod State University, Russia)
A. Z. Shvidenko (International Institute for Applied Systems Analysis, Austria)
T. A. Shishkov (Pushkarov Soil Science Institute, Bulgaria)

© ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, 2022 г.

© Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Таежные глеево-дифференцированные почвы на почвенной карте РСФСР масштаба 1:2.5 млн в системе классификации почв России 2004 г.

Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. 5

Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов

Савин И.Ю., Бербеков С.А., Тутукова Д.А. 31

Зимография: особенности постановки метода визуализации активности ферментов в почвах

*Тимофеева М.В., Абросимов К.Н., Юдина А.В.,
Фомин Д.С., Ключева В.В.* 58

Влияние полимерной модификации комплексного удобрения на эффективность использования фосфора и калия озимой пшеницей на южном черноземе

*Баматов И.М., Васильева Н.А., Владимиров А.А.,
Васильев Т.А., Перевертин К.А.* 90

Влияние биоугля на развитие яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и кислотность дерново-подзолистой почвы в Западной Сибири

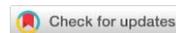
*Пономарев К.О., Первушина А.Н., Кортаева К.С.,
Юртаев А.А., Петухов А.С., Табакаев Р.Б.,
Шаненков И.И.* 110

CONTENTS

Floodplain soils on the soil map of the Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, 1988, in the Russian soil classification, 2004 <i>Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V.</i>	5
Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status <i>Savin I.Y., Berbekov S.A., Tutukova D.A.</i>	31
Zymography: developing of the enzyme soil activity visualization method <i>Timofeeva M.V., Abrosimov K.N., Yudina A.V., Fomin D.S., Klyueva V.V.</i>	58
Influence of polymer modification of complex fertilizer on the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat on the southern chernozem <i>Bamatov I.M., Vasilyeva N.A. Vladimirov A.A. Vasiliev T.A., Perevertin K.A.</i>	90
Biochar influence on the development of spring wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) and acidity of soddy-podzolic soil in Western Siberia <i>Ponomarev K.O., Pervushina A.N., Korotaeva K.S., Yurtaev A.A., Petuhov A.S., Tabakaev R.B., Shanenkov I.I.</i>	110

УДК 638.47

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-5-30



Ссылки для цитирования:

Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Таежные глеево-дифференцированные почвы на почвенной карте РФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России 2004 г. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 5-30. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-5-30

Cite this article as:

Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Floodplain soils on the soil map of the Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, 1988, in the Russian soil classification, 2004, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 113, pp. 5-30, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-5-30

Таежные глеево-дифференцированные почвы на почвенной карте РФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России 2004 г.

© 2022 г. Т. В. Ананко^{1*}, М. И. Герасимова^{1,2**}, Н. В. Савицкая¹

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0002-7317-6790>,

e-mail: anankotat@yandex.ru.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,

**<https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,

e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.

Поступила в редакцию 02.10.2022, после доработки 24.10.2022,
принята к публикации 27.12.2022

Резюме: Самый большой ареал таежных глеево-дифференцированных почв на Почвенной карте РФСР масштаба 1 : 2.5 млн находится на севере Западной Сибири. Отдельные малые ареалы встречаются на северо-западе Европейской России, в Восточной Сибири и на Северо-Востоке. Неоднозначность перевода глеево-дифференцированных почв в систему и идеологию классификации почв России (2004 г.) связана с широким разнообразием экологических условий и вариабельностью морфологических, физико-химических и химических свойств этих почв в

разных их ареалах. Путем сравнения свойств таежных глеево-дифференцированных почв, приведенных в Программе карты 1972 г. и региональных работах, с диагностическими критериями типов почв в разных отделах классификации определялось их место и название. В результате *таежные глеево-дифференцированные* почвы средней и северной тайги Западной Сибири вошли в несколько отделов: слабо дифференцированные и слабо оглеенные почвы с бурым профилем – в отдел органо-аккумулятивных почв; их более гидроморфные варианты – таежные глеево-дифференцированные торфянистые – в отдел глееземов, тип *торфяно-глееземы*; почвы с морфологически дифференцированным профилем при наличии у них характерной криогенной структуры – в отдел криометаморфических почв – *светлоземы* и *светлоземы иллювиально-железистые глееватые*; и в отдел структурно-метаморфических почв – тип *элювиально-метаморфические*, если криогенная структура отсутствует. В северо-западном ареале глеево-дифференцированные почвы приурочены к ленточным глинам и соответствуют (*дерново*)-*элювиально-метаморфическим глееватым* почвам.

Ключевые слова: анализ картографических единиц, региональный подход, свойства почв, диагностика глееземов, разнообразие условий почвообразования.

Floodplain soils on the soil map of the Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, 1988, in the Russian soil classification, 2004

© 2022 T. V. Ananko^{1*}, M. I. Gerasimova^{1,2**}, N. V. Savitskaya¹

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-7317-6790>,

e-mail: anankotat@yandex.ru.

²Lomonosov Moscow State University,

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,

e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.

Received 02.10.2022, Revised 24.10.2022, Accepted 27.12.2022

Abstract: The largest area of taiga gley-differentiated soils on the Soil map of Russian Federation, scale 1:2.5 M, is located in the north of West Siberia. Small areas are dispersed over the northwestern European Russia, Eastern

Siberia and the North-East. Interpretation of taiga gley-differentiated soils in terms of Russian soil classification system (2004) is rather ambiguous owing to high diversity of ecological conditions where these soils occur, as well as variability of soil morphological, chemical, and physicochemical properties in diverse mapping units. Comparing properties of taiga gley-differentiated soils described in the Program of the map (1972) and in regional publications with the diagnostic criteria for soil types in some orders of the Russian classification system made it possible to find adequate names and taxonomic position for these soils. Thus, taiga gley-differentiated soils in the middle and northern taiga of Western Siberia proved to be allocated to several orders: weakly differentiated and gleyed soils with a brown profile were referred to the order of organo-accumulative soils as *shallow-peat gleyic soils*; their more hydromorphic variants – taiga gley-differentiated shallow-peat soils were defined in the order of gleyzems, as *peat gleyzems*, soil with morphologically differentiated profile having a particular cryogenic structure were qualified for *svetlozems* and *iron-illuvial gleyic svetlozems* in the order of cryometamorphic soils, and for *eluvial-metamorphic soils* of the same order in case of cryogenic structure was absent. Taiga gley-differentiated soils in their northwestern area are confined to varved clays and correspond to (*soddy*)-*eluvial-metamorphic gleyic soils*.

Keywords: analysis of mapping units, regional approach, soil properties, gleyzem diagnostic, diversity of soil environments.

ВВЕДЕНИЕ

Обновление Почвенной карты РСФСР 1988 г. масштаба 1 : 2.5 млн, проводимое в Почвенном институте им. В.В. Докучаева, начинается с перевода легенды и содержания карты в идеологию и номенклатуру классификации почв России ([Классификация..., 2004 \(КиДПР\)](#); [Полевой определитель..., 2008](#)). Различия в подходах к классификации почв и появление новой информации со времени создания карты были причинами пересмотра названий почв в ряде случаев, и/или изменений состава почв в контурах карты в разных регионах. Примеры достаточно радикальных изменений, т. е. переименования почв и разделения одной картографической единицы на несколько единиц легенды были рассмотрены ранее ([Ананко и др., 2017](#); [Конюшков и др., 2020](#)). Такими единицами легенды Почвенной карты РСФСР 1988 г. (далее ПКРФ) являются *таежные глеево-дифференцированные*

почвы с уточняющим названием глееземы и слабоглеевые дифференцированные, в том числе оподзоленные таежные и их торфянистые аналоги; они имеют индексы Γ^o и Γ^{ot} , соответственно, в легенде и на карте. Наиболее детально эти почвы были изучены Н.А. Караваевой в средней тайге Западной Сибири (1973; 1982), и ее представления о них в основном используются в данной статье. Как основное название рассматриваемых почв, так и уточняющее, можно считать паллиативными.

Сложность и неоднозначность перевода этих почв в систему КиДПР связана с несколькими причинами: во-первых, в классификации почв России не используются “ландшафтные” названия, в данном случае – “таежные”; во-вторых, механизм дифференциации профиля глеевых почв, или глееземов, недостаточно ясен; почвы, представляющие эту единицу легенды, показаны на карте в разных регионах – мерзлотных и немерзлотных, с разной степенью континентальности климата и переувлажнения, на породах разного гранулометрического состава и под разной растительностью; наконец, диагностика этих единиц легенды в Программе карты (1972) очень неопределенна. Так, исходя из описания свойств почв, приведенного в Программе, таежные глеево-дифференцированные почвы могут изменяться в зависимости от региона от сильно оглеенных с горизонтом G до слабо оглеенных по всему профилю с признаком g. При этом в одних случаях оглеение постепенно слабеет с глубиной к неоглеенной породе, в других – оно усиливается до стабильно оглеенной породы. Кроме того, морфологически и химически элювиально-иллювиальная дифференциация профиля может быть выражена как отчетливо, так и очень слабо. Очевидно, что эта единица легенды объединяет почвы с разными свойствами и должна переводиться в систему КиДПР по-разному.

Самый обширный ареал таежных глеево-дифференцированных почв находится на севере Западной Сибири (рис. 1). Небольшими ареалами эти почвы встречаются также на северо-западе Европейской России, в мерзлотных областях Восточной Сибири и Северо-Востока.

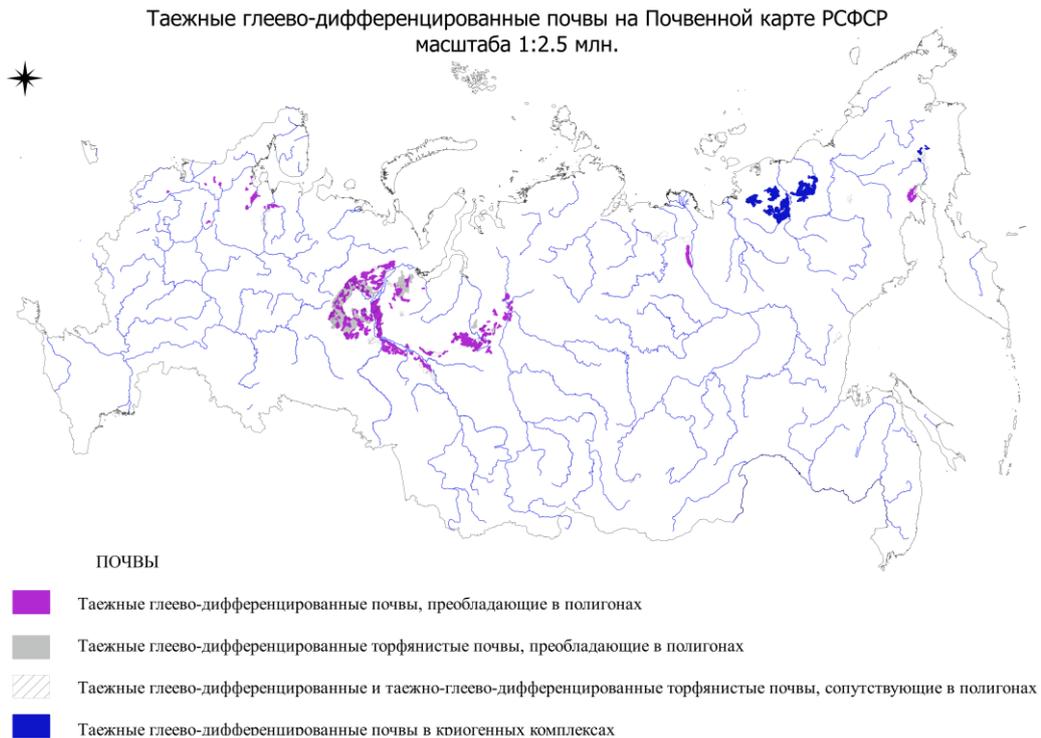


Рис. 1. Таежные глеево-дифференцированные почвы (таежные глееземы и слабоглеевые дифференцированные, в том числе оподзоленные) и их торфянистые аналоги в полигонах карты РСФСР.
Fig.1. Taiga gley-differentiated soils (taiga gleyzems and weakly gleyic differentiated, including podzolized) and their peat analogues in the polygons of the Soil map of Russian Federation.

На почвенной карте в Атласе Ханты-Мансийского автономного округа (Атлас ХМАО, 2004) почти все таежные глееводифференцированные почвы Западной Сибири, вплоть до широтного отрезка долины Оби, были переведены в отдел криометаморфических почв ([Тонконогов, 2004](#)), что вызывает определенные сомнения.

Обращение к литературным материалам иллюстрирует широкий спектр названий почв, которые по своим свойствам и пространственной приуроченности коррелируют с таежными глееводифференцированными почвами (табл. 1). Почти во всех авторских названиях почв “глеевые” элементы сочетаются с указанием дифференцированности профиля, оподзоленности, элювиирования. Уточнению классификационного положения таежных глееводифференцированных почв на ПКРФ в системе классификации почв России посвящена настоящая статья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом географо-генетического анализа является элемент содержания почвенной карты 1988 г.: единица легенды “таежные глеево-дифференцированные почвы” и ее торфянистый аналог с их ареалами на карте, а также опубликованные морфологические описания разрезов и результаты анализов физико-химических свойств таежных глеево-дифференцированных почв, имеющиеся для тех регионов России, где эти почвы выделены на ПКРФ. Дополнительно привлекались картографические материалы, информация о почвообразующих породах с исходной ПКРФ.

Методом исследования принято сравнение свойств таежных глеево-дифференцированных почв в их представлении в Программе карты и в региональных материалах с диагностическими критериями разных почв в классификации почв России.

Сравнивались таежные глеево-дифференцированные почвы в картографических единицах ПКРФ – полигонах ее цифровой версии, с почвами, охарактеризованными в публикациях по территориям, соответствующим полигонам карты или максимально близким к ним. Решения о переименовании почв, точнее, интерпретации свойств почв в отношении их соответствия критериям выделения типов или подтипов почв, имеющихся в КиДПР, при-

нимались путем создания формул профилей почв.

Таблица 1. Названия почв в региональных публикациях, ареалы которых соответствуют на карте таежным глеево-дифференцированным почвам (в том числе торфянистым).

Table 1. Names of soils, which areas correspond to mapping units of taiga gley-differentiated soils (peat ones included) in regional publications.

Названия почв в публикациях	Регион	Авторы
Типичные таежно-поверхностно-глеевые; охристо-элювиально-глеевые; подзолисто-элювиально-глеевые	Западная Сибирь: Тюменская область.	Долгова, Гаврилова, 1971; Атлас Тюменской области, 1971
Элювиально-глееватые; торфянисто-элювиально-глеевые; подзолистые элювиально-глееватые Глееземы таежные дифференцированные	Западная Сибирь: Сосьвинское Приобье	Караваева, 1973 Караваева, 1982
Подзолистые поверхностно-глееватые	Западная Сибирь: Среднеобская низменность	Гаджиев, Овчинников, 1977
Таежные поверхностно-глееватые	Северо-Запад европейской России: Карелия, долина Онеги	Руднева, 1984
Элювиальные; дерново-элювиально-глеевые, псевдоглии	Северо-Запад Европейской России	Матинян, 2003
Мерзлотные северо-таежные глееватые Мерзлотные северо-таежные оподзоленные Криоземы глееватые оподзоленные	Северная Якутия	Еловская и др., 1979 Еловская, 1987
Таежные элювиально-глеевые, в том числе оподзоленные	Магаданская область	Наумов, Игнатенко, 1990; Наумов, 1976
Глее-мерзлотно-таежные Подзолистые мерзлотные оглеенные Подзолистые пропитанно-иллювиально-гумусовые глубинно-глееватые мерзлотные	Магаданская область Магаданская область	Наумов, 1976 Наумов, 1977

Исходными были формулы – перечни горизонтов и признаков в Программе карты, они дополнялись и/или корректировались сведениями из региональных публикаций и контролировались обращением к условиям почвообразования: положением полигона в определенной (под)зоне и определенных литолого-геоморфологических и мерзлотных условиях. Принимался также во внимание состав почвенного покрова полигонов в базе данных ПКРФ. В результате формировалось название почвы для обновленной легенды.

На исходной карте имеется 151 полигон, где таежные глеево-дифференцированные почвы являются преобладающими (первая почва soil0); вместе с торфянистыми таежными глеево-дифференцированными почвами – 186 полигонов, и 38 полигонов, в которых они являются сопутствующими (soil1, soil2, soil3); с учетом торфянистых вариантов – 77 полигонов. В 44 полигонах данные почвы находятся в составе комплексов. Итого, на ПКРФ показано 307 полигонов таежных глеево-дифференцированных почв. Напомним, что количество всех почвенных полигонов в базе данных ПКРФ составляет 25 711.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные ареалы таежных глеево-дифференцированных почв локализованы на ПКРФ следующим образом: (1) на севере Западной Сибири в пределах Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов, а также в приенисейской части Красноярского края; (2) на северо-западе европейской России: в Карелии, Архангельской и Новгородской областях; (3) на севере Средней и Восточной Сибири в пределах Якутии; (4) на Северо-Востоке в Магаданской области и Корякском автономном округе (рис. 1). Рассмотрим особенности почв и почвенного покрова этих ареалов как обоснование для перевода почв в систему КиДПР.

Западносибирский ареал

Ареал охватывает обширную территорию средне-и северо-таежной подзон региона (рис. 1). Детальная характеристика почв западной части ареала, на примере Сосьвинского Приобья, где сосредоточено максимальное количество полигонов глеево-диффе-

ренцированных почв, дана в работе Н.А. Караваевой “Почвы тайги Западной Сибири” (1973). По степени дифференцированности профиля Н.А. Караваева делит их на две группы. Почвы со слабо дифференцированным профилем отнесены к *элювиально-глееватым*. Они формируются под коренными темнохвойными или производными светлохвойными кустарничково-зеленомошными лесами на хорошо дренированных ровных участках водораздельных равнин. Почвообразующие породы относятся преимущественно к средне- и тяжелосуглинистым, встречаются также валунно-галечниковые суглинки и обратные двучлены (Почвенная карта..., 1988).

В профиле почв под органометным горизонтом со средней мощностью 7–10 см залегает серия бурых и коричнево-бурых горизонтов тонкослоистого сложения со слабыми признаками оглеения в виде сизоватых мелких пятен и разводов на общем не оглеенном фоне. С глубины 50–80 см оглеение усиливается, но остается стабильным, не превышая условного уровня глееватости: бледные сизые и ржавые пятна и разводы на общем буром фоне. Авторская формула профиля: $O-Bg_1-Bg_2-BCg-Cg$ не отражает его дифференциации или оподзоленности. Однако среди основных профилеобразующих процессов, наряду с разложением растительных остатков и формированием мощных оторфованных горизонтов, Н.А. Караваева отмечает незначительное элювиально-иллювиальное перераспределение валовых форм оксидов железа и алюминия, что совпадает с диагностическими свойствами таежных глеево-дифференцированных почв, приведенными в Программе карты (1972). Минеральная масса горизонтов оглеена слабо. Почвы характеризуются также кислыми и слабокислыми значениями рН, ненасыщенностью, высоким содержанием гумуса и оксалаторастворимых соединений железа и алюминия в верхних минеральных горизонтах, слабым перераспределением их по профилю.

Перевод почв в систему КиДПР затруднен тем, что перечисленные свойства не позволяют отнести их ни к отделу глеевых почв, так как в их профиле отсутствует диагностический горизонт G, ни к отделу гидроморфных неглеевых почв – криоземов, так как в них не упоминаются криогенные нарушения почвенного

профиля; кроме того, в этом регионе многолетняя мерзлота отсутствует в минеральных почвах и встречается только в болотах ([Геокриологические условия Западно-Сибирской..., 1967](#)).

В.Д. Тонконогов отмечает, что глеево-дифференцированные почвы средней тайги западнее верхней Оби по морфологическому облику напоминают буроземы. Было высказано предположение, что их формирование связано “с близостью Урала и поступлением на равнину материала, относительно обогащенного минералами, способными к выветриванию в процессе почвообразования” (Тонконогов, 2010, стр. 193). Другое классификационное решение – отнесение их к отделу криометаморфических, было принято В.Д. Тонконоговым на Почвенной карте Ханты-Мансийского автономного округа (Атлас..., 2004). Оно обосновывалось наличием очень слабой цветовой и глинистой дифференциации профиля, и, что еще более важно, характерной творожистой или мелкоореховатой острореберной структурой в срединных горизонтах. Предположение о буроземной природе глееземов дифференцированных севера Западной Сибири не согласуется с зональным положением почв и некоторыми их свойствами. Буроземы, как известно, формируются в узком ареале хвойно-широколиственных и широколиственных лесов, а рассматриваемые почвы приурочены к средней и северной тайге. В профиле почв отсутствуют гумусовые горизонты АУ или АУ, что является обязательным диагностическим элементом буроземов ([Классификация..., 2004](#)). Кроме того, характерное для буроземов метаморфическое оглинение срединных горизонтов не подтверждается гранулометрическим анализом рассматриваемых почв: им свойственно равномерное распределение тонких фракций по профилю. Отнесение таежных глеево-дифференцированных почв Сосьвинского Приобья со слабо дифференцированным профилем к криометаморфическим также не подтверждается описаниями почвенных разрезов, приведенными в работе Н.А. Караваевой ([1973](#)): специфическая криогенная структура в них отсутствует.

Одним из возможных вариантов классификационного решения в системе КиДПР для этой группы таежных глеево-дифференцированных почв, имеющих наиболее однородный профиль, является отнесение их к отделу органо-аккумулятивных почв: в них

отсутствуют срединные диагностические горизонты, которые могли бы быть сформированы четко выраженными горизонтообразующими процессами. Ясно выражено слабое оглеение, обычно диагностирующее подтипы в различных отделах КиДПР. По характеру верхнего горизонта, который может быть определен в системе КиДПР как торфяной с элементами опадо-подстилочного О, грубогумусовый АО, перегнойный Н или как их сочетание, глеево-дифференцированные почвы могут быть названы торфянистыми (грубогумусовыми, перегнойными) глееватыми; дополнительно, при наличии слабой дифференциации профиля по железу или илистой фракции, соответственно, – ожелезненными или глинисто-иллювируемыми почвами; профиль: О(АО, Н)-АСg-Сg.

С ухудшением дренированности профиля ареалы глеево-дифференцированных почв сменяются ареалами их торфянистых вариантов. По материалам Н.А. Караваевой (1973) в них нарастает мощность органических горизонтов до 15–20 см, усиливается оглеение, появляется массивность сложения, вязкость, тиксотропность. Минеральные горизонты описываются как буровато-сизые, сизо-ржавые. Между верхним горизонтом и сильно оглеенной толщей есть небольшой мощности (3–5 см) бурый слой с отчетливой гумусовой прокраской – пропиткой. Морфологический профиль имеет строение (О)Т-Gox,hi-G-СG, и почвы определяются по КиДПР как торфяно-глееземы потечно-гумусовые. По своим физико-химическим свойствам они близки описанным выше; элювиально-иллювиальная дифференциация практически отсутствует. При еще большем увлажнении торфяно-глееземы замещаются торфяными олиготрофно-глеевыми почвами верховых болот с мощностью торфа > 50 см (профиль ТО-ТТ-G).

По данным Л.С. Долговой и И.П. Гавриловой (1971), проводивших исследования в северной части ареала глеево-дифференцированных почв под листовеннично-еловыми редколесьями, прослеживается та же закономерность: процесс оглеения в почвах (авторское название – таежно-поверхностно-глеевые) усиливается. В профиле с глубины 60 см обнаруживается мерзлота, а минеральные горизонты описываются как серовато-сизые и сизоголубоватые. Мощность оторфованной подстилки в среднем составляет 8–10 см, и торфянистые глееватые суглинистые и глини-

стые почвы закономерно сменяются к северу глееземами типичными или торфяно-глееземами.

В условиях лучшей дренированности почвенного профиля на приречных склонах водораздельных равнин, высоких террасах, вершинах холмов и увалов элювиально-глееватые почвы замещаются *подзолистыми элювиально-глееватыми почвами* с отчетливой морфологической дифференциацией профиля ([Караваева, 1973](#)). На ПКРФ они также отнесены к таежным глееводифференцированным оподзоленным. От рассмотренной выше группы морфологически не дифференцированных почв они отличаются наличием светло-серого горизонта A_{2g} , мощностью в среднем 3–5 см и иллювиального горизонта B_g часто самого ярко-го в профиле охристой или ржаво-бурой окраски. В минеральных горизонтах в интервале глубин 10–80 см отмечается икрянистая или острореберно-мелкоореховатая структура. Глееватость выражена слабо в срединных горизонтах и нарастает с глубиной. Авторская формула профиля $A_0-A_{2g}-B-B_g-BC_g-C_g$ ([Караваева, 1973](#)). Отбеленный и иллювиальный горизонты отличаются от аналогичных горизонтов подзолистых почв европейской России рядом свойств: горизонт A_2 уплотнен, имеет тяжелый гранулометрический состав, четко выраженное тонкослоеватое сложение; в то же время горизонт B характеризуется отсутствием повышенного уплотнения, не имеет многопорядковой ореховато-призматической структуры, характерной для “классических” текстурно-дифференцированных почв ([Классификация..., 2004](#)). При наличии цветовой и структурной дифференциации профиля, дифференциации по илу не происходит, его содержание либо распределено равномерно по профилю, либо оно оказывается даже более высоким в горизонте A_2 чем в иллювиальном. На основании данных валового и минералогического анализа илистой фракции подзолисто-элювиально-глееватых почв Н.А. Караваева делает вывод о слабом развитии в горизонте A_2 подзолообразования. Позднее она убирает термин “подзолистые” из названия этих почв, оставляя только *глееземы таежные дифференцированные* ([Караваева, 1982](#)). Отмеченная дифференциация почвенного профиля связывается с образованием при выветривании первичных минералов оксалаторастворимых соединений железа и их мобилизацией в

осветленном горизонте в период максимального переувлажнения. Они осаждаются в горизонте В в соответствии с периодически существующими в нем окислительными условиями.

В терминах КиДПР процесс интерпретируется следующим образом: осветленный горизонт несет черты как подзолистого горизонта Е, так и элювиального EL, а иллювиальный горизонт не отвечает диагностическим критериям текстурного горизонта ВТ. Его структура – икрянистая, творожистая, мелкоореховатая, характерна для криометаморфического горизонта CRM, в котором глееватость по определению выражена слабо. По данным Н.М. Федоровой ([Федорова, 1970](#)), средняя часть профиля таких почв представляет собой зону наиболее активных фазовых превращений влаги в замерзшей почве, влияющих на структурообразование. На основании изложенного, профилю рассматриваемых почв придается следующая формула: O-Eg(ELg)-BF(g)-CRMg-Cg, – и почвы могут быть отнесены к светлоземам иллювиально-железистым глееватым. В некоторых случаях иллювиально-железистый горизонт отсутствует, и почвы относятся к светлоземам глееватым.

Морфологически дифференцированные, преимущественно легкосуглинистые почвы были изучены И.М. Гаджиевым и С.М. Овчинниковым ([1977](#)) в бассейнах притоков Оби Большого Югана и Ваха и названы подзолистыми поверхностно-глееватыми. Их ареалы совпадают с ареалами глееземов дифференцированных на ПКРФ в пределах Среднеобской низменности. По мнению авторов, несмотря на некоторое сходство по морфологическим, физико-химическим и химическим свойствам с подзолистыми почвами, они значительно отличаются от них, прежде всего, слабым проявлением подзолообразования при ясной морфологической дифференциации профиля. Интенсивность оглеения авторами оценивается на уровне признака глееватости (g). В то же время в минеральных горизонтах таежных глеево-дифференцированных почв не формируется характерная криогенная структура. Она описывается как слоеватая, неясно комковатая, поэтому легкосуглинистые дифференцированные глееземы этой части ареала не могут быть отнесены к светлоземам. Возможное классификационное решение – элювиально-метаморфические почвы.

Таким образом, исходные таежные глеево-дифференцированные почвы Западно-Сибирского ареала на ПКРФ разделяются на несколько групп. В пределах Сосьвинского Приобья в автономных условиях без дополнительного поверхностного увлажнения на суглинистых и глинистых озерных и аллювиальных отложениях формируются морфологически очень слабо дифференцированные и оглеенные почвы, которые предлагается относить к органо-аккумулятивному отделу. При затрудненном дренаже в пределах средней и северной тайги, а также на границе с лесотундрой процесс оглеения становится доминирующим, и исходные глеево-дифференцированные торфянистые почвы переходят в отдел глеевых как глееземы и торфяно-глееземы. В противном случае, при улучшении дренированности почвенного профиля усиливается его дифференциация, и почвы диагностируются как светлоземы глееватые или светлоземы иллювиально-железистые глееватые в отделе криометаморфических почв. Главным аргументом в пользу отнесения почв к светлоземам является криогенная острорезберно-мелкоореховатая или икрянистая, иногда даже мелкозернистая структура срединного горизонта. Она формируется в таежных почвах Западной Сибири, преимущественно средне-суглинистых, только при определенном режиме увлажнения и промерзания – оттаивания. Об ограниченности распространения почв криометаморфического отдела Среднеобской низменности на легкосуглинистых отложениях делают вывод и некоторые другие авторы ([Аветов и др., 2012](#)). Почвы части ареала таежных глеево-дифференцированных почв в Приобье в пределах Среднеобской низменности при отсутствии криогенной структуры в минеральных горизонтах могут быть классифицированы как элювиально-метаморфические.

Восточноевропейский ареал

Небольшой ареал таежных глеево-дифференцированных почв имеется на ПКРФ на северо-западе Европейской России (рис. 1). В Карелии они были описаны Е.Н. Рудневой и названы таежными поверхностно-глееватыми ([Руднева, 1984](#)). На Почвенной карте Архангельской области ареалы таежных глеево-дифференцированных почв ПКРФ совпадают с ареалами единицы

легенды “*подзолистые и подзолы поверхностно-глееватые на ленточных глинах*” ([Атлас Архангельской области, 1976](#)). Все остальные глеево-дифференцированные почвы этого региона также коррелируют на ПКРФ с тяжелосуглинисто-глинистыми озерно-аллювиальными отложениями, преимущественно с ленточными глинами. Характерны также среднетаежные еловые зеленомошные леса.

Приводим подробное описание Е.Н. Рудневой типичного разреза глеево-дифференцированных почв как пример подходов к интерпретации свойств почв благодаря наличию их детального описания.

Разрез заложен в заповеднике “Кивач”. Органическая часть профиля включает оторфованную подстилку и тонкий перегнойный слой (потери при прокаливании 60–70%) общей мощностью 5–7 см. Ниже следует фрагментарный светлосерый глинистый подгоризонт A_1A_2 мощностью 1–2 см, рыхлого сложения с непрочной чешуйчатой структурой. Горизонт ABh неоднородной окраски (от тускло-бурой до коричневато-охристой), мощностью 10–15 см, комковато-зернистый в сухом состоянии, творожистый – во влажном, содержит много органо-железистых стяжений, заметны признаки вымывания органического вещества. Следующий контактно-осветленный горизонт (PA_2g) мощностью 25–30 см, буровато-палевый, местами палево-белесоватый, плотный, бесструктурный с большим количеством конкреций, постепенно сменяется серовато-бурым очень плотным (почти слитым) с неясно выраженным ленточным сложением трещиноватым горизонтом (трещины заполнены пылеватым и глинистым веществом) мощностью 40–50 см (PBt_1g), переходящим в тонкослоистую ленточную глину палево-белесого цвета ($PBtC$). Авторская формула профиля: $0-A_0-A_1A_2-ABh-PA_2g-PBt_1g-PBtC-C$.

Е.Н. Рудневой отмечены особые свойства этих почв: отсутствие оподзоливания или слабое его проявление, наличие оптически ориентированных глин по стенкам пор и трещин, высокое содержание подвижных форм железа и алюминия в верхней части профиля, большое количество микроконкреций в контактно-оглеенном горизонте, осаждение подвижных соединений в нижней части профиля. Пониженное содержание ила в верхних гори-

зонтах связано не только с процессами переноса тонкодисперсных частиц по вертикальным трещинам в результате лессиважа, но и с исходной неоднородностью ленточных глин. Можно предположить, что с ней также связано контактное оглеение.

В системе диагностических горизонтов и признаков КиДПР профиль Е.Н. Рудневой интерпретируется следующим образом. Сочетание оторфованной подстилки с перегнойным слоем можно определить как грубогумусовый или торфянисто-перегнойный горизонт, либо сохранить его прежнее название “торфяно-подстилочный” (O); подгоризонт A₁A₂ соответствует горизонту ELg, хотя и маломощному. Тонкая горизонтальная слоистость ленточных глин, по-видимому, сильно ограничивает вертикальную миграцию, следовательно, и мощность элювиального горизонта. Нижележащий горизонт A₁B с комковато-зернистой структурой в сухом состоянии и творожистой во влажном состоянии может быть образован несколькими процессами. С одной стороны, он расположен на небольшой глубине, и в нем содержится значительное количество корней, много бактериальной и грибной микрофлоры ([Руднева, 1984](#)), поэтому хорошо выраженная структура имеет педогенную природу. С другой стороны, его бурый или коричнево-охристый цвет, осаждение в нем подвижных органо-железистых комплексов свидетельствуют о его метаморфической природе, а переменный характер водного режима, частые процессы промерзания – оттаивания в весенне-осенний период не исключают участия криогенных процессов в формировании структуры этого горизонта. По КиДПР, он может быть метаморфическим горизонтом BM с признаками железистой модификации альфегумусового (f) и “обязательной” глееватости. Возможны также элементы криометаморфического признака (cm). Профиль в целом может быть представлен как: O(AO)-ELg-BMf,g, (cm)-ПDek,td,nn. В итоге почва определена как элювиально-метаморфическая (грубогумусовая) ожелезненная, глееватая на ленточной глине. Признаки, связанные со свойствами породы, в частности контактное осветление, заполнение трещин иллювирированной глиной, относятся к конкретному профилю и могут не вводиться в перевод легенды ПКРФ. Ранее к аналогичным выводам пришла Н.Н. Матинян, исследуя поверхностно-оглеенные почвы

на ленточных глинах на северо-западе Европейской России. Основным профилообразующим процессом она считает “глеевую мобилизацию химических соединений и удаление их из профиля преимущественно боковым внутрипочвенным стоком” ([Матинян, 2003](#)). Остальные процессы, свойственные таежным почвам, – оподзоливание, лессиваж, оглинивание – являются сопутствующими, не оказывающими серьезного влияния на дифференциацию почвенного профиля. Поэтому она выводит их из группы подзолистых почв и называет псевдоглеями. В КидДПР им соответствуют элювиально-метаморфические и дерново-элювиально-метаморфические почвы.

Таким образом, глееземы дифференцированные таежные в условиях более теплого и менее континентального климата северо-запада Европейской России интерпретируются как почвы отдела структурно-метаморфических почв – элювиально-метаморфические, в которых формирование структуры связано преимущественно с почвенными процессами.

Восточно-Сибирский и Северо-Восточный ареалы

Таежные глеево-дифференцированные почвы этих ареалов показаны на ПКРФ на равнинах, в долинах рек и межгорных впадинах на легкосуглинистых, в том числе валунно-галечниковых, отложениях, реже на средних суглинках и плотных породах в горах, что существенно отличает их от почв других ареалов, приуроченных к тяжелым почвообразующим породам. Большая часть этих почв входит в состав полигонально-трещинных и неупорядочно-пятнистых комплексов; всего таких полигонов на карте 29; полигонов с однородным составом почв – 20. Главным отличием почв этих ареалов от описанных выше является наличие льдистой мерзлоты, “замыкающей” профиль, что было отражено еще одной единицей легенды в Программе ПКРФ “глееземы дифференцированные (в том числе оподзоленные) глеевые и глееватые мерзлотные”, но в окончательный вариант легенды она не вошла. Занимая по своим свойствам промежуточное положение между собственно подзолистыми оглееными, гомогенными глеевыми и гидроморфными неглеевыми почвами, рассматриваемые почвы относились в региональной литературе и на картах к разным морфогенетиче-

ским группам: глееземов, криоземов, текстурно-дифференцированных почв ([Еловская и др., 1979](#); [Еловская, 1987](#); [Петрова, 1971](#); [Тетерина, 1972](#); [Наумов, 1971](#), [1976](#), [1977](#); [Наумов, Игнатенко, 1990](#); [Наумов, 1993](#)) (табл. 1).

В Якутской части ареала глеево-дифференцированным почвам по их географической приуроченности на карте, а также диагностическим свойствам соответствуют мерзлотные северо-таежные оподзоленные почвы, выделяемые авторами как на равнинах, так и в горах ([Атлас сельского..., 1989](#); [Еловская, 1979](#); [Наумов, 1976](#)). Ввиду малочисленности материалов с подробными морфологическими описаниями и анализами физико-химических свойств этих почв, выводы об их классификационной принадлежности в системе КиДПР носят предварительный характер. Почвы формируются в условиях наилучшего дренажа, по сравнению с другими таежными глеевыми почвами региона. Растительные сообщества однообразны и представлены бруснично-моховыми и лишайниково-моховыми лиственничными лесами и редколесьями с ерником; в травянистом ярусе – багульником, голубикой, хвощами. Микрорельеф может быть выражен отчетливо или очень слабо.

Авторская формула профиля: $A_0-A_0A_1-(A_1A_2, A_2B, A_2)-B_1g-BCg-1Cg$ ([Еловская, 1987](#)). Не исключается формирование и собственно осветленного элювиального горизонта A_2 буровато-серого или белесо-серого цвета, в котором часто наблюдается слабая глееватость в виде светло-охристых и сизоватых пятен; с глубиной оглеение усиливается. Горизонты $A_0-A_0A_1$ маломощны (в сумме 4–5 см), горизонты A_2Bg и B_1 бурого цвета с хорошо выраженной структурой, при этом горизонт A_2Bg неоднородно окрашен, есть сизоватые и светло-охристые пятна. Нижележащие горизонты имеют более легкий гранулометрический состав, не оглеены или оглеены очень слабо, и структура не выражена. Криогенные нарушения почвенного профиля и тиксотропные свойства также не наблюдаются. По данным гранулометрического анализа распределение илистых частиц или равномерное по профилю или со слабо выраженным максимумом в его средней части. Валовые формы оксидов железа и алюминия такого перераспределения не обнаруживают в равнинных почвах, но четко фиксируются в гор-

ных. Значения рН изменяются от кислых в верхних горизонтах до почти нейтральных в нижних. Характерной особенностью этих почв является угловато-мелкокомковатая или зернистая структура в срединных горизонтах. Формулу профиля по КиДПР можно представить таким образом: Oh(AO)-CRMe,g(Eg)-CRMg-1BCg-Cg, – и почвы могут быть отнесены к грубогумусовым криометаморфическим оподзоленным глееватым или к светлоземам.

На Северо-Востоке почвы, близкие по свойствам и географической приуроченности к таежным глеево-дифференцированным, в том числе оподзоленным, назывались по-разному (табл. 1). Среди них глее-мерзлотно-таежные и подзолистые мерзлотно-оглеенные почвы были детально описаны Е.М. Наумовым (Наумов, 1993). Профиль первых очень слабо дифференцирован, характеризуется преобладанием бурых тонов в окраске в сочетании с сизоватыми и ржавыми пятнами. Отмечается тиксотропность, надмерзлотная верховодка, четкие криогенные признаки в профиле и на поверхности почвы; перераспределение тонких фракций, валовых и несиликатных форм железа и алюминия по профилю выражено незначительно. Органические горизонты торфянистые или торфянисто-перегнойные. Срединные горизонты характеризуются зернисто-крупитчатой или творожистой структурой. Сочетание четко выраженных криогенных признаков с криометаморфической структурой минеральных горизонтов свидетельствует о переходном характере этих почв, которые могут быть отнесены либо к криоземам криометаморфизованным глееватым со строением профиля O(h)-CRg,crm-Cg, либо к органо-криометаморфическим глееватым криотурбированным почвам; строение профиля O(h)-CRMg,@-C.

Подзолистые мерзлотно-оглеенные почвы характеризуются ясной морфологической дифференциацией, элювиально-иллювиальным распределением ила, оксидов железа и алюминия по профилю. Под осветленным серым белесоватым бесструктурным горизонтом залегает иллювиальный горизонт золотисто-желтого, кофейного или охристого цвета, который сменяется коричнево-бурый горизонтом с четко выраженной крупнозернистой или творожистой структурой. Предположительно, почвы могут быть отнесены к светлоземам иллювиально-железистым или иллювиаль-

но-железисто-гумусовым, возможно также глинисто-иллювирированным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широкая трактовка диагностических свойств единицы легенды ПКРФ *таежные глеево-дифференцированные (глееземы и слабо глеевые дифференцированные, в том числе оподзоленные таежные почвы)* в Программе Почвенной карты СССР (1972) и географическая разобщенность их ареалов на карте вызвала необходимость регионального подхода для определения их аналогов в классификации почв России. Поиск аналогов предполагал наличие оглеения, слабую дифференциацию профиля и зависимость свойств почв от дренированности местности.

Проведенный анализ подтвердил, что единица легенды “таежные глеево-дифференцированные почвы” (и их торфянистые варианты) включает как почвы с простым морфологически почти недифференцированным профилем, так и почвы с осветленными горизонтами, слабо выраженными горизонтами иллювиирования альфегумусового типа или криометаморфическими горизонтами. Признаки оглеения отмечаются во всех почвах, как и отсутствие текстурного горизонта ВТ, что резко отделяет рассматриваемую группу почв от почв отдела текстурно-дифференцированных.

Самый большой ареал таежных глеево-дифференцированных морфологически не оподзоленных почв расположен в северо-и среднетаежной подзонах Западной Сибири. Описания почв этих территорий свидетельствуют об отсутствии в части почв диагностических срединных горизонтов, что позволяет отнести их к отделу органо-аккумулятивных. В слабо дренированных почвах усиливается оглеение, увеличивается мощность органических горизонтов, что на карте отражалось дополнением “торфянистые” к основному названию. В КиДПР они диагностируются как тип торфяно-глееземов в отделе глеевых почв. В условиях достаточной дренированности на суглинистых породах формируются почвы с осветленными горизонтами и срединными, имеющими элементы структуры, характерной для криометаморфического горизонта светлосемов.

Таблица 2. Результаты географо-генетической интерпретации таежных глеево-дифференцированных почв, в том числе торфянистых в формате классификации почв России.

Table 2. Results of geographical and genetic interpretation of taiga gley-differentiated soils (peat ones included) in terms of classification of soils of Russia.

Регион, зона	Названия почв по КиДПР в условиях различного характера увлажнения	
	только атмосферное	дополнительное поверхностное или надмерзлотное
Западная Сибирь, северная и средняя тайга	Торфянистые глееватые на средних и тяжелых суглинках Светлоземы глееватые, светлоземы глееватые иллювиально-железистые на средних суглинках Элювиально-метаморфические глееватые на легких суглинках	Торфяно-глееземы (потечно-гумусовые)
Западная Сибирь, крайнесеверная тайга	Глееземы и торфяно-глееземы	Торфяно-глееземы
Европейская Россия, северо-запад, средняя и южная тайга	Элювиально - и дерново-элювиально-метаморфические глееватые на глинах	Глееземы и глеевые, перегнойные или торфянистые
Восточная Сибирь, Северо-Восток, северная тайга	Органо-криометаморфические глееватые и светлоземы глееватые, в том числе иллювиально-железистые на легких и средних суглинках, в том числе щебнистых Криоземы глееватые криометаморфизованные	Глееземы перегнойные и торфяно-глееземы

Таежные глеево-дифференцированные почвы восточно-европейского ареала переведены в элювиально-метаморфические (грубогумусовые) почвы в средней тайге и в дерново-элювиально-метаморфические почвы в южной тайге. В ареале рассматриваемых почв в Восточной Сибири и Северо-Востоке таежные глеево-дифференцированные почвы предварительно могут быть отнесены к отделу криоземов или криометаморфических почв (табл. 2). Названия всех почв содержат подтиповой признак “глееватые”, что отвечает их объединению в исходной легенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветов Н.А., Аветян С.А., Дорофеева Е.И., Трофимов С.И.* Автоморфные таежные почвы Среднеобской низменности // Почвоведение. 2012. № 7. С. 728–734.
2. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Опыт обновления почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1411–1420. DOI: [10.7868/S0032180X17120024](https://doi.org/10.7868/S0032180X17120024).
3. Атлас Тюменской области. М.: ГУГК, Вып. 1. Москва–Тюмень, 1971. 198 с.
4. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: ГУГК, 1989. 117 с.
5. Атлас Архангельской области. М.: ГУГК, 1976. 72 с.
6. *Гаджиев И.М., Овчинников С.М.* Почвы средней тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. 152 с.
7. Генезис и свойства почв Томского Приобья. Томск: Томский ун-т, 1980. 168 с.
8. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности М.: Наука, 1967. 214 с.
9. *Долгова Л.С., Гаврилова И.П.* Особенности почв средне- и северотаежных подзон Западной Сибири (в пределах Тюменской области) // Природные условия западной Сибири. М: Моск. ун-т, 1971. С. 77–90.
10. *Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. Новосибирск: Изд-во Наука, Сиб. отд., 1979. 301 с.
11. *Еловская Л.Г.* Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: АН СССР, СО, 1987. 172 с.
12. *Караваяева Н.А.* Почвы тайги Западной Сибири. М.: Наука, 1973. 166 с.

13. *Караваяева Н.А.* Заболачивание и эволюция почв. М.: Наука, 1982. 286 с.
14. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
15. *Конюшков Д.Е., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Лебедева И.И.* Актуализация содержания почвенной карты РСФСР масштаба 2.5 млн в формате классификации почв России для создания новой цифровой карты. Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 21–48. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-102-21-48](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-21-48).
16. *Матинян Н.Н.* Почвообразование на ленточных глинах озерно-ледниковых равнин северо-запада России. С-П.: С. Петербургский ун-т, 2003. 198 с.
17. *Наумов Е.М., Игнатенко И.В.* Почвенная карта Магаданской области М 2.5 млн. М.: ГУГК, 1990. 2 листа.
18. Почвенная карта Северо-Востока Евразии 1 : 2.5 млн. *Е.М. Наумов / ред. Л.Л. Шишов, И.А. Соколов, Н.Н. Розов* и др. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, РАСХН, 1993.
19. *Наумов Е.М.* Объяснительная записка к листу О-56 “Магадан”, М.: Изд-во ВАСХНИЛ, Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1977. 43 с.
20. *Наумов Е.М.* Почвы Магаданской области и их агрохимическая характеристика // Агрохимическая характеристика почв СССР. Дальний Восток. АН СССР, Почв. Ин-т им. В. В. Докучаева. М.: Наука, 1971. С. 240–313.
21. *Наумов Е.М.* Почвы и почвенный покров Юкагирского плоскогорья // Биологические проблемы Севера VII симпозиум (почвоведение, агрохимия мелиорация), Петрозаводск, 1976. С. 101–103.
22. *Петрова Е.И.* Процессы подзолообразования в Южной Якутии // Почвенные и ботанические исследования в Южной Якутии. Якутск, Якутское книжное изд., 1972. С. 3–6.
23. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
24. Почвенная карта РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн / под ред. *В.М. Фридланда*. М.: ГУГК, 1988. 16 листов.
25. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2001. 400 с.
26. Программа Почвенной карты СССР 1 : 2 500 000 / под ред. *В.М. Фридланда*. М: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1972. 158 с.
27. *Руднева Е.Н.* Влияние антропогенного фактора на свойства и гидротермический режим таежных поверхностно-глеватых почв // Почвы и почвенный покров лесной и степной зон СССР и их

рациональное использование. Науч. Тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1984. С. 84–94.

28. Федорова Н.М. Температурный режим суглинистых почвогрунтов водоразделов Западной Сибири Сосьвинского Приобья и некоторые аспекты современного почвообразования // Почвоведение. 1970. № 3. С. 74–91.

REFERENCES

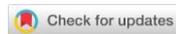
1. Avetov N.A., Avetyan S.A., Dorofeeva E.I., Trofimov S.I., Avtomorfnye taezhnye pochvy Sredneobskoi nizmennosti (Automorphic taiga soils of the Sredneobskaya lowland), *Pochvovedenie*, 2012, No. 7, pp. 728–734.
2. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Opyt obnovleniya pochvennoi karty RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln v sisteme klassifikatsii pochv Rossii (Experience of updating the soil map of the RSFSR scale 1 : 2.5 million in the Russian soil classification system), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1411–1420, DOI: [10.7868/S0032180X17120024](https://doi.org/10.7868/S0032180X17120024).
3. *Atlas Tyumenskoi oblasti* (Atlas of the Tyumen region), Moscow: GUGK, Issue 1, Moskva–Tyumen', 1971, 198 p.
4. *Atlas sel'skogo khozyaistva Yakutskoi ASSR* (Atlas of agriculture of the Yakut ASSR), Moscow: GUGK, 1989, 117 p.
5. *Atlas Arkhangel'skoi oblasti (Atlas of the Arkhangelsk region)*, Moscow: GUGK, 1976, 72 p.
6. Gadzhiev I.M., Ovchinnikov S.M., *Pochvy srednei taigi Zapadnoi Sibiri* (Soils of the middle taiga of Western Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1977, 152 p.
7. *Genezis i svoystva pochv Tomskogo Priob'ya* (Genesis and properties of soils of the Tomsk Ob region), Tomsk: Tomskii un-t, 1980, 168 p.
8. *Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoi nizmennosti* (Geocryological conditions of the West Siberian Lowland), Moscow: Nauka, 1967, 214 p.
9. Dolgova L.S., Gavrilova I.P., *Osobennosti pochv sredne- i severotaezhnykh podzon Zapadnoi Sibiri (v predelakh Tyumenskoi oblasti), Prirodnye usloviya zapadnoi Sibiri* (Features of soils of the middle and North Taiga subzones of Western Siberia (within the Tyumen region), In: Natural conditions of Western Siberia, Moscow: Mosk. un-t, 1971. pp. 77–90.
10. Elovskaya L.G., Petrova E.I., Teterina L.V., *Pochvy Severnoi Yakutii* (Soils of Northern Yakutia), Novosibirsk: Izd-vo Nauka, Sib. otd., 1979, 301 p.

11. Elovskaya L.G., *Klassifikatsiya i diagnostika merzlotnykh pochv Yakutii* (Classification and diagnostics of permafrost soils of Yakutia), Yakutsk: AN SSSR, SO, 1987, 172 p.
12. Karavaeva N.A., *Pochvy taigi Zapadnoi Sibiri* (Soils of the taiga of Western Siberia), Moscow: Nauka, 1973, 166 p.
13. Karavaeva N.A., *Zabolachivanie i evolyutsiya pochv* (Waterlogging and soil evolution), Moscow: Nauka, 1982, 286 p.
14. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification I diagnostics pochv Rossii), Smolensk: Oikumena, 2004, 341 p.
15. Konyushkov D.E., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Actualization of the contents of the soil map of Russian Federation (1 : 2.5 M scale) in the format of the classification system of Russian soils for the development of the new digital map of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 102, pp. 21–48, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-102-21-48](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-21-48).
16. Matinyan N.N., *Pochvoobrazovanie na lentochnykh glinakh ozerno-lednikovyykh ravnin severo-zapada Rossii* (Soil formation on ribbon clays of lake-glacial plains of North-West Russia), Saint-Petersburg: S. Peterburgskii un-t, 2003, 198 p.
17. Naumov E.M., Ignatenko I.V., *Pochvennaya karta Magadanskoi oblasti M 2.5 mln* (Soil map of the Magadan region M 2.5 million), Moscow: GUGK, 1990. 2 sheets.
18. Naumov E.M., Shishov L.L., Sokolov I.A., Rozov N.N. et al., *Pochvennaya karta Severo-Vostoka Evrazii 1 : 2.5 mln* (Map of the soils of the northeast of Eurasia 1: 2.5 million), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, RASKhN, 1993.
19. Naumov E.M., *Ob"yasnitel'naya zapiska k listu O-56 "Magadan"* (About"explanatory note to sheet O-56 "Magadan"), Moscow: Izd-vo VASKhNiL, Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1977, 43 p.
20. Naumov E.M., *Pochvy Magadanskoi oblasti i ikh agrokhimicheskaya kharakteristika, Agrokhimicheskaya kharakteristika pochv SSSR* (Soils of the Magadan region and their agrochemical characteristics, Agrochemical characteristics of soils of the USSR), Dal'nii Vostok, AN SSSR, Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, Moscow: Nauka, 1971, pp. 240–313.
21. Naumov E.M., *Pochvy i pochvennyi pokrov Yukagirskogo ploskogor'ya Biologicheskie problemy Severa VII simpozium (pochvovedenie, agrokhimiya melioratsiya)* (Soils and soil cover of the Yukaghir plateau, *Proc. Biological problems of the North (soil science, agrochemistry, reclamation)*), Petrozavodsk, 1976, pp. 101–103.
22. Petrova E.I., *Protessy podzoloobrazovaniya v Yuzhnoi Yakutii, Pochvennye i botanicheskie issledovaniya v Yuzhnoi Yakutii* (Podzol formation

- processes in South Yakutia, Soil and botanical studies in South Yakutia) Yakutsk, Yakutskoe knizhnoe izd, 1972, pp. 3–6.
23. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field determinant of soils of Russia), Moscow: Pochvennyi in-t im V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.
24. Fridland V.M., *Pochvennaya karta RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln* (Soil map of the RSFSR scale 1 : 2.5 million), Moscow: GUGK, 1988, 16 sheets.
25. *Pochvennyi pokrov i zemel'nye resursy Rossiiskoi Federatsii* (Soil cover and land resources of the Russian Federation), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2001, 400 p.
26. Fridland V.M., *Programma Pochvennoi karty SSSR 1 : 2 500 000* (The program of the Soil map of the USSR 1 : 2 500 000), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1972, 158 p.
27. Rudneva E.N., Vliyanie antropogenogo faktora na svoistva i gidrotermicheskii rezhim taezhnykh poverkhnostno-gleevatykh pochv, Pochvy i pochvennyi pokrov lesnoi i stepnoi zon SSSR i ikh ratsional'noe ispol'zovanie, In: *Nauch. Tr. Pochvennogo in-ta im. V.V. Dokuchaeva* (Scientific works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow, 1984, pp. 84–94.
28. Fedorova N.M., Temperaturnyi rezhim suglinistykh pochvogruntov vodorazdelov Zapadnoi Sibiri Sos'vinskogo Priob'ya i nekotorye aspekty sovremennogo pochvoobrazovaniya (Temperaturnyi rezhim suglinistykh pochvogruntov vodorazdelov Zapadnoi Sibiri SOS'vinskogo Priob'ya I nekotorye aspekty sovremennogo pochvoobra-zovaniya), *Pochvovedenie*, 1970, No. 3, pp. 74–91.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Бербеков С.А., Тутукова Д.А. Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 31-57. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57

Cite this article as:

Savin I.Y., Berbekov S.A., Tutukova D.A. Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 113, pp. 31-57, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Программы развития научных центров мирового уровня (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-321).

Acknowledgments:

The research was supported by the Program for the Development of World-class Scientific Centers (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 075-15-2022-321).

Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов

© 2022 г. И. Ю. Савин^{1,2*}, С. А. Бербеков³, Д. А. Тутукова⁴

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

²Российский университет дружбы народов, Россия,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

³Научно-образовательный центр КБЦН РАН,
360002, Кабардино-Балкарская республика, Долинск, ул. Балкарова, д. 8.

⁴Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН,
360002, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Кирова, д. 224.

Поступила в редакцию 13.09.2022, после доработки 31.11.2022,
принята к публикации 27.12.2022

Резюме: Одним из самых важных направлений прикладного использования знаний о почвах является решение сельскохозяйственных задач. От почвенных условий сильно зависит урожайность сельскохозяйственных культур и кормовых угодий. Поэтому точная информация о почвах является важным компонентом информационного обеспечения сельскохозяйственного производства. В качестве основы для получения данных о почвах земельного участка используют почвенную карту. Но информация на почвенной карте во многих случаях не отражает пространственное варьирование всех агрономически важных свойств почв, что приводит к схематичности и неточности анализа почвенной информации при принятии управленческих решений. Предложен новый подход к комплексной оценке неоднородности почвенного покрова полей по состоянию посевов, базирующийся на детальном анализе состояния посевов в севообороте по многолетним архивам спутниковых данных. Карты неоднородностей почвенного покрова отдельных полей, получаемые на основе предложенных подходов, существенно отличаются от традиционно составленных почвенных карт и более точно, с точки зрения агроэкологических требований посевов сельскохозяйственных культур, отражают пространственные неоднородности свойств почв, определяющих их актуальное плодородие.

Ключевые слова: агроэкологическая оценка почв, неоднородности посевов, спутниковый мониторинг посевов, почвенная карта.

Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status

© 2022 I. Yu. Savin^{1,2*}, S. A. Berbekov³, D. A. Tutukova⁴

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

²Institute of Environmental Engineering of RUDN University,
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation.

³Scientific-Educational Center of KBCN RAS,
2 Balkarova Str., Dolinsk 360002, Kabardino-Balkarian Republic,
Russian Federation.

⁴Institute of Agriculture – Branch of Kabardino-Balkarian
Scientific Center RAS,

*224 Kirova Str., Nalchik 360002, Kabardino-Balkarian Republic,
Russian Federation.*

Received 13.09.2022, Revised 31.11.2022, Accepted 27.12.2022

Abstract: One of the most important applications of soil knowledge is in agricultural processes and crop production. Crop and forage yields strongly depend on soil conditions. Therefore, accurate soil information is an important component of informational support for agricultural production. A soil map is used as the basis for obtaining the soil data of a land plot. But the information on the soil map in many cases does not reflect the spatial variation of all agronomically important properties of soils, which leads to oversimplified and inaccurate analysis of soil information when making management decisions. A new methodology of applied soil mapping for agricultural purposes, based on a detailed analysis of the state of crops in a crop rotation with the use of multi-year satellite data archives, is proposed. The maps of soil inhomogeneity of individual fields, obtained on the basis of the proposed approaches, differ significantly from the traditionally developed soil maps and more accurately reflect the spatial heterogeneity of soil properties, predetermining their actual fertility.

Keywords: agro-ecological assessment of soils, crop heterogeneity, satellite monitoring of crops, soil map.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых важных направлений прикладного использования знаний о почвах с момента становления почвоведения как науки является решение сельскохозяйственных задач. От почвенных условий сильно зависит урожайность сельскохозяйственных культур и кормовых угодий ([Oldfield et al., 2019](#)), а также сама возможность их возделывания в том или ином регионе ([The Aims of Land Evaluation, 2019](#)). Поэтому точная информация о почвах является важным компонентом информационного обеспечения сельскохозяйственного производства и включена во многие информационно-аналитические системы ([Козубенко, 2018](#)). В качестве основы для получения данных о почвах земельного участка используют почвенную карту. Но информация на почвенной карте во многих случаях не отражает пространственное варьирование всех агрономически важных свойств почв, а показывает лишь выделы почв в той или иной классификации или их комбинаций

([Савин, 2016](#); [2020](#)). Из названия почв в почвенной классификации можно в обобщенном виде получить информацию о свойствах почв (но не обо всех агрономически важных), так как практически все свойства почв так или иначе коррелируют друг с другом ([Lal, 2014](#); [Rabot et al., 2018](#)). На этом подходе построены практически все методы агроэкологической оценки почв как в России ([Методическое руководство..., 2005](#)), так и за рубежом ([Manikandan et al., 2013](#)). Но их использование приводит к схематичности и неточности анализа почвенной информации в процессе принятия управленческих решений при возделывании сельскохозяйственных культур ([Савин, 2020](#)). Подобные подходы были предложены еще во времена В.В. Докучаева ([Докучаев, 1877](#)) и нуждаются в модернизации и детализации с учетом последних научных достижений в области цифрового картографирования и пространственного моделирования почв ([Цифровая почвенная картография..., 2012](#)) и развития дистанционных методов их детектирования и мониторинга ([Савин, Симакова, 2012](#)).

В данной статье изложен новый подход к оценке почвенных неоднородностей поля на основе анализа многолетних архивов спутниковых данных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для иллюстрации предложенной методологии использовались тестовые поля, расположенные в разных природных зонах России и с разным набором возделываемых культур.

Первое поле расположено в Ленинградской области (Меньково – 59°25'23.01" N, 30°01'23.25" E, площадью 26 га), второе – в Тульской области (Стрелецкое – 53°48'25.65" N, 36°45'46.24" E, площадью 63 га), третье – в Кабардино-Балкарской республике (Белокаменское – 43°53'08.05" N, 43°01'24.64" E, площадью 31 га) (рис. 1).

На поле “Меньково” преобладают дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы в разной степени переувлажненные и смытые. В состав севооборота на поле входят озимая пшеница, яровой ячмень, картофель, однолетние травы.

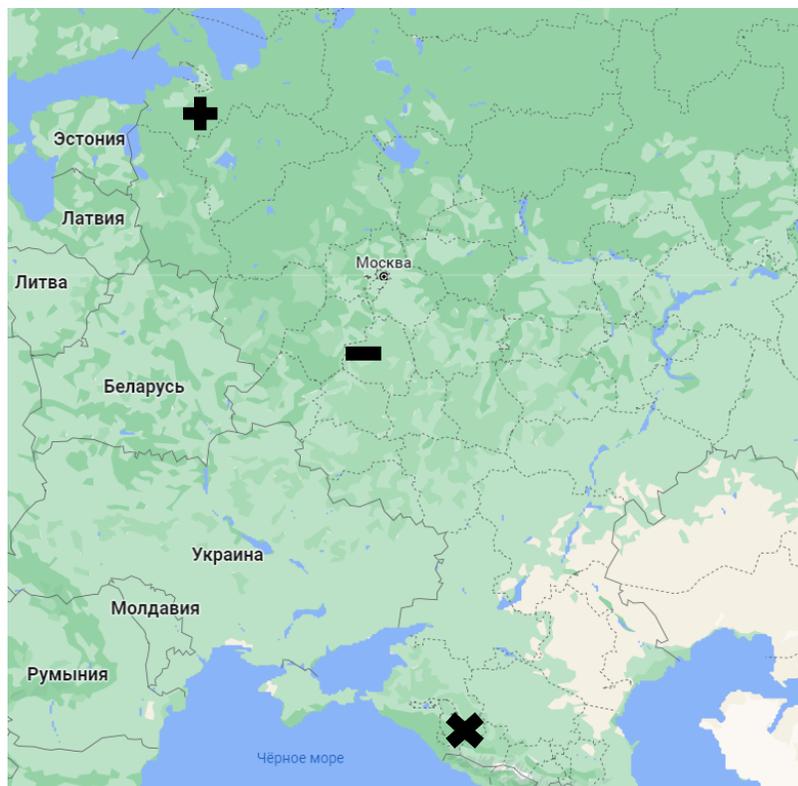


Рис. 1. Расположение тестовых участков (+ – Меньково, - – Стрелецкое, х – Белокаменское).

Fig. 1. Layout of test sites (+ – Menkovo, - – Streletskoe, х – Belokamenskoe).

На поле “Стрелецкое” – серые лесные тяжелосуглинистые почвы, которые в разной степени эродированы на склонах. В состав севооборота на поле входят озимая пшеница, черный пар, рапс, яровая пшеница, гречиха.

На поле “Белокаменское” преобладают горные черноземы типичные малогумусные, среднемощные, слабодэфлированные, местами слабосмытые среднесуглинистые. Основными возделываемыми культурами на поле являются картофель, кукуруза на силос,

озимая пшеница и ячмень.

Для анализа цвета открытой поверхности почв использовались спутниковые данные Sentinel-2 за последние 7 лет. Эти же данные применялись для анализа неоднородностей посевов на тестовых полях. В качестве индикатора неоднородностей посевов служил вегетационный индекс NDVI ([Kriegler et al., 1969](#)), который на протяжении уже более 40 лет является основным для многих систем спутникового мониторинга растительности ([Толпин и др., 2010](#); [Becker-Reshef et al., 2010](#); [Wu, 2014](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный подход

Для повышения точности информации о почвах конкретного земельного участка, необходимой для принятия управленческих решений при возделывании сельскохозяйственных культур, целесообразно отказаться от отражения на карте выделов почв в какой-либо базовой классификации (классификационные выделы почв). Использование традиционной почвенной карты, на которой отражены классификационные выделы почв, приводит к неточным и схематичным результатам. Это связано с тем, что классификационно важные свойства почв базовой классификации часто или не важны для оценки качества почв для сельскохозяйственных целей, или представлены не в тех градациях, и, наоборот, важные для роста сельскохозяйственных растений свойства почв часто не важны для базовой классификации почв. Например, для целей классификации черноземов важно наличие в профиле почв карбонатных новообразований и глубина их залегания, а для многих возделываемых сельскохозяйственных культур это свойство почв не имеет практически никакого значения (то есть, не сказывается на их урожайности). С другой стороны, например, актуальное содержание питательных веществ – архиважная информация для выращивания сельскохозяйственных культур – на традиционных почвенных картах вовсе не отражается.

Следовательно, прикладная карта почв для земледельческих задач должна отражать пространственные неоднородности тех свойств почв, которые важны для решения именно этих задач.

На основе обобщения мирового опыта специалистами ФАО был определен список свойств почв, которые могут использоваться в качестве базовых для оценки их качества и пригодности для возделывания тех или иных сельскохозяйственных культур и которые могут лимитировать сельскохозяйственное производство ([A framework for land..., 1976](#)). Данный список, конечно же, не является исчерпывающим и может быть усовершенствован. Он отражает уровень научных знаний в области влияния свойств почв на развитие сельскохозяйственных растений на момент создания списка. Но, учитывая то, что практически все свойства почв связаны друг с другом, его можно рассматривать как набор основных индикаторных или лимитирующих свойств почв для роста сельскохозяйственных культур.

Необходимо также отметить, что создание почвенной карты, отражающей пространственное варьирование каждого из этих свойств почв, может быть осуществлено традиционно, методом построения картограмм свойств, используя в качестве основы традиционно составленную почвенную карту. Но в этом случае, как отмечалось выше, не все нужные свойства могут быть “выведены” из классификационного положения почв, отраженных на традиционно составленной почвенной карте. Или некоторые свойства будут “выведены” с большими неточностями. В результате можно получить карту, которая будет неточной или слишком схематичной для решения сельскохозяйственных задач.

Альтернативным и более логичным методом является картографирование каждого из лимитирующих почвенных свойств по отдельности, независимо друг от друга и от классификационных выделов почв и затем, пересечением этих карт отдельных свойств почв, например в ГИС, получать некие элементарные выделы, однородные по своим лимитирующим почвенным свойствам. Построенная подобным образом почвенная карта должна теоретически в гораздо большей степени отражать географию лимитирующих свойств почв, чем традиционно составленная почвенная карта. Но на практике мы сталкиваемся с проблемой отсутствия надежных и оперативных методов картографирования отдельных (нужных для решения нашей задачи) свойств почв. Решать задачу картографирования отдельных свойств почв можно, отказавшись

от подходов факторного картографирования почв и переходя на методы, основанные на большом количестве точек полевого опробования с последующей геостатистической интерполяцией (или пространственным моделированием) ([Савин, 2022](#)). Ограничением этих методов является большая трудоемкость, длительность и высокая затратность работ, что делает их применение на больших территориях практически невозможным.

Часть лимитирующих свойств почв может быть оперативно закартирована на основе использования данных дистанционного зондирования ([Ge et al., 2011](#)).

В таблице 1 приведен перечень основных лимитирующих рост сельскохозяйственных растений свойств почв и оценены возможности их спутниковой индикации по данным литературных источников.

Но на данном этапе развития дистанционных методов в почвоведении речь пока может идти лишь о некоторых свойствах пахотного горизонта почв ([Савин и др., 2019](#)), а не о свойствах всего потенциально корнеобитаемого слоя почв, что необходимо. В перспективе могут быть установлены связи между свойствами пахотного горизонта почв и свойствами нижележащих горизонтов, которые послужат основой для косвенного дистанционного детектирования и свойств почв нижележащих горизонтов.

На современном этапе информацию о свойствах корнеобитаемой толщи почв можно также получить косвенно, по характеру изображения растительности на данных дистанционного зондирования ([Serteser et al., 2008](#); [Fischer et al., 2019](#)). И данный подход представляется наиболее логичным. Если свойства корнеобитаемого слоя почв не лимитируют развитие сельскохозяйственных растений, то необходимости в их учете нет, так как они не влияют на урожайность.

Существующие на настоящий момент архивы спутниковых данных высокого разрешения (Landsat, Sentinel, 10–30 м) вполне позволяют оценить пространственные неоднородности растительности на конкретных полях в течение всего сезона вегетации за последние несколько десятков лет, что позволяет оценить неоднородности посевов разных культур всего используемого севооборо-

та, причем в разных метеорологических условиях (т. е. проследить за изменениями нескольких временных севооборотов на поле).

Таблица 1. Возможности картографирования отдельных свойств почв на основе дистанционных методов по прямым дешифровочным признакам
Table 1. Possibilities of mapping individual soil properties based on remote sensing methods by direct decoding features

№ п/п	Лимитирующее свойство почв (A framework for land evaluation..., 1976)	Возможность дистанционного картографирования	Примеры в научной литературе
1	Дренированность почв	Да	(Asgari et al., 2020)
2	Присутствие паводков и их продолжительность	Да	(Gleason, Durand, 2020)
3	Грансостав пахотного горизонта почв	Да	(Bousbih et al., 2019)
4	Содержание включений в пахотном горизонте	Да	(Karjalainen et al., 2021)
5	Содержание включений в подпахотном горизонте	Нет	-
6	Мощность мелкоземистой толщи почвы	Нет	-
7	Содержание карбонатов кальция в корнеобитаемом слое почв	Да, если они есть в поверхностном горизонте	(Qi et al., 2021)
8	Содержание гипса в корнеобитаемом слое почв	Нет	-

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

№ п/п	Лимитирующее свойство почв (A framework for land evaluation..., 1976)	Возможность дистанционного картографирования	Примеры в научной литературе
9	Емкость катионного обмена в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
10	Насыщенность основаниями в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
11	Величина pH в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
12	Содержание гумуса в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
13	Содержание воднорастворимых солей в корнеобитаемом слое почвы	Да, если они есть в поверхностном горизонте	(Wang et al., 2021)
14	Содержание поглощенного натрия в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
15	Уровень залегания грунтовых вод	Нет	-

Выявляемые таким образом неоднородности посевов могут индцировать не только о присутствии влияния лимитирующих свойств почв на поле. На появление неоднородностей могут оказывать влияние и другие факторы, не связанные со свойствами почв (болезни, вредители, неравномерность использования средств химизации и др.). Но устойчивость неоднородностей по-

сево́в одной культуры на поле в течение нескольких сезонов в большинстве случаев свидетельствует о влиянии именно почвенного фактора.

Таким образом, подобные неоднородности могут служить достаточно надежным индикатором присутствия в корнеобитаемом слое почв лимитирующих рост растений почвенных свойств.

Необходимо также отметить, что в большинстве случаев на конкретном поле в качестве лимитирующих свойств почв присутствуют лишь 2–3 из всех потенциально возможных, что значительно облегчает их детектирование и интерпретацию выявляемых неоднородностей.

Следовательно, подход для выявления и картографирования пространственных неоднородностей лимитирующих свойств почв (АНП – Агрономически важные Неоднородности Почвенного покрова) может быть представлен в следующем виде (рис. 2).

В основе подхода лежит использование многолетних архивов спутниковых данных. На первом этапе из архива отбираются все безоблачные и бесснежные атмосферно скорректированные изображения на территорию поля за последние 7 лет. Это позволяет оценить неоднородности изображения посевов и почв и особенности их варьирования в разных сезонах вегетации. Опыт подобных работ показывает, что для каждого сезона вегетации за последние годы может быть получено около 5–10 изображений в зависимости от региона исследований.

После этого все изображения делятся на две группы: с изображением открытой поверхности почв, и с изображением посевов. В качестве критерия для выделения изображений с открытой поверхностью почв достаточно использовать пороговое значение NDVI, которое подбирается экспертно и является индивидуальным для каждого поля.

Для изображений с открытой поверхностью почв проводится выделение контрастных неоднородностей. Наиболее простым способом является визуальное дешифрирование по монитору компьютера каждого из изображений с использованием в качестве подложки синтеза каналов спутниковых изображений в цветах близких к натуральным.

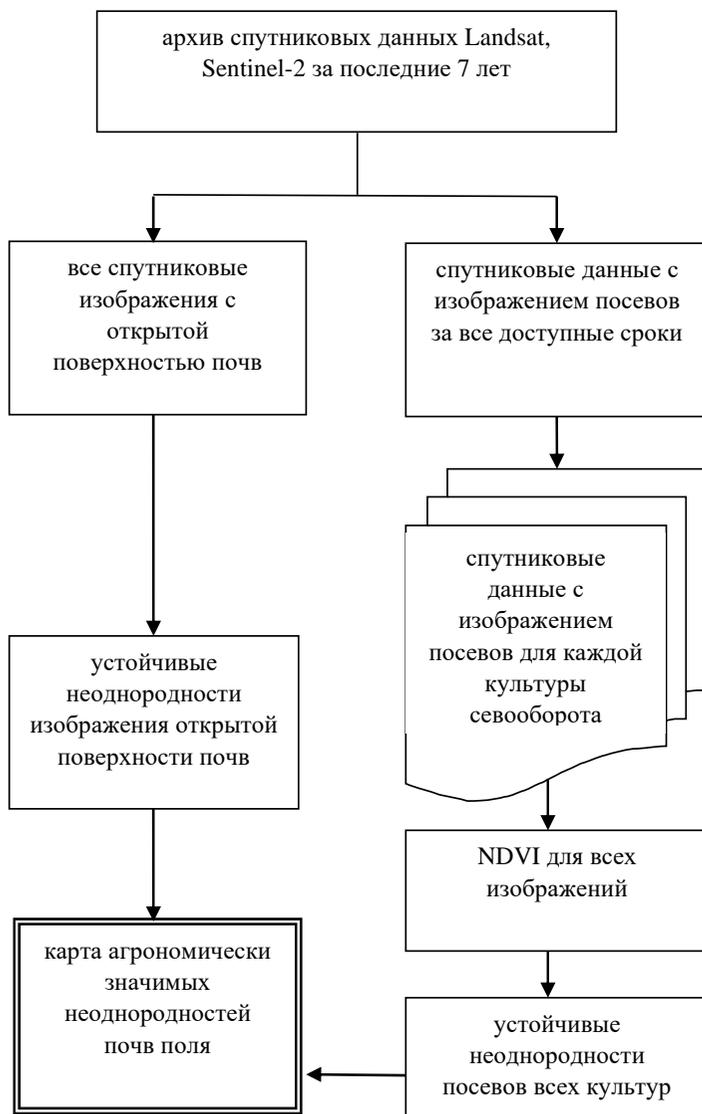


Рис. 2. Подход к построению карты АНП.

Fig. 2. Approach to the construction of ASSP (Agronomically Sound Soil Patterns) map.

Затем все результаты дешифрирования анализируются совместно для выявления зон устойчивых неоднородностей и зон неустойчивых неоднородностей. К зонам неустойчивой неоднородности относятся участки поля в случае неоднозначности их выявления на снимках разного срока (в одни сроки они выявляются, в другие – нет). Устойчивые неоднородности выявляются на всех анализируемых изображениях. Анализ также проводится экспертно.

Однако выявление неоднородностей изображения открытой поверхности почв может быть и автоматизированно (например, путем классификации отдельных изображений с использованием алгоритма ISODATA, пересечением всех полученных результатов классификации с последующим анализом устойчивости автоматизированно выделенных классов). Результатом этого этапа анализа является карта неоднородностей открытой поверхности почв.

На следующем этапе аналогичным образом проводится анализ неоднородностей изображения посевов. В качестве основы для выделения неоднородностей используется карта вегетационного индекса NDVI посевов в разные этапы вегетации и в разные годы.

На последнем этапе работ устойчивые неоднородности, выявленные по открытой поверхности почв, совмещаются (пересекаются) с устойчивыми неоднородностями посевов, в результате чего получается карта устойчивых неоднородностей почв поля. Эта карта рассматривается нами как карта неоднородностей почв поля по агрономически важным свойствам (АНП). Выделам карты при необходимости приписываются в качестве атрибутов конкретные лимитирующие свойства почв, для чего используется традиционная почвенная карта и/или результаты полевых обследований почв каждой из выделенных зон, а также результаты оценки качества почв (ранжирования почв по качеству), полученные на основе анализа поведения NDVI в каждом выделе. Эта информация также является результатом экспертной оценки.

Необходимо отметить, что на каждом конкретном поле в качестве лимитирующих выступают не все свойства почв, перечисленные в таблице 1, а лишь несколько из них. Какие конкретно свойства почв могут лимитировать возделывание сельскохозяйственных культур на конкретном поле, можно определить на ос-

нове анализа традиционно составленной почвенной карты или просто на основе знания специфики почвенного покрова региона.

Примеры использования предложенного подхода

На рисунке 3 приведены примеры контурной части карт АНП полей в сопоставлении с выделами традиционно составленных почвенных карт.

Из рисунка следует, что контурная часть карт сильно не совпадает. Карты АНП более детальны. Судя по данным рисунка, степень детальности зависит от пространственных неоднородностей агрономически важных свойств почв конкретного поля (большее варьирование свойств на поле “Меньково” и меньшее варьирование свойств на поле “Стрелецкое”).

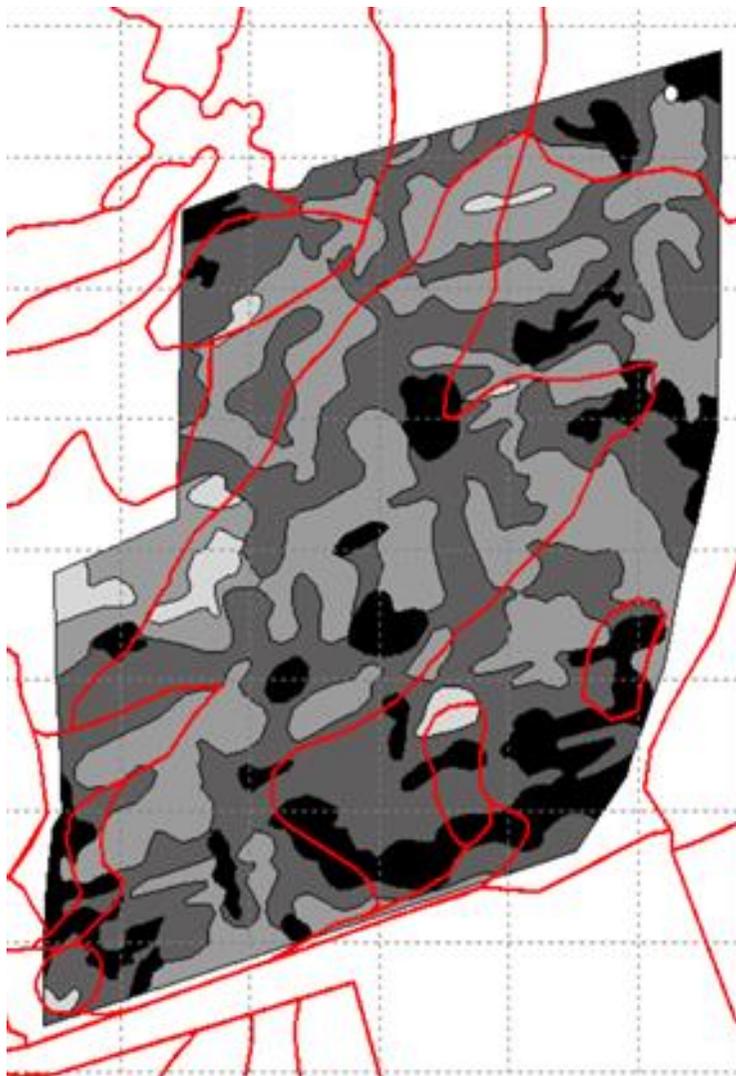
Выделам карт АНП поля нельзя приписать какое-либо классификационное наименование почвы, так как границы карты АНП не являются границами классификационных выделов почв. Они могут быть охарактеризованы лишь набором тех лимитирующих свойств почв, которые присутствуют в выделе. Таким образом карты АНП являются больше оценочными картами, чем чисто почвенными, и отражают зоны (участки) поля, которые однородны с точки зрения лимитирующих свойств почв и степени их влияния.

Карты АНП не рассматриваются в качестве замены традиционно составляемых почвенных карт. У этих карт разное целевое назначение. Традиционно составляемые почвенные карты предназначены для отражения географии почв того или иного региона в терминах принятой классификации почв и объектом их картографирования являются классификационные выделы почв ([Савин, 2016](#)).

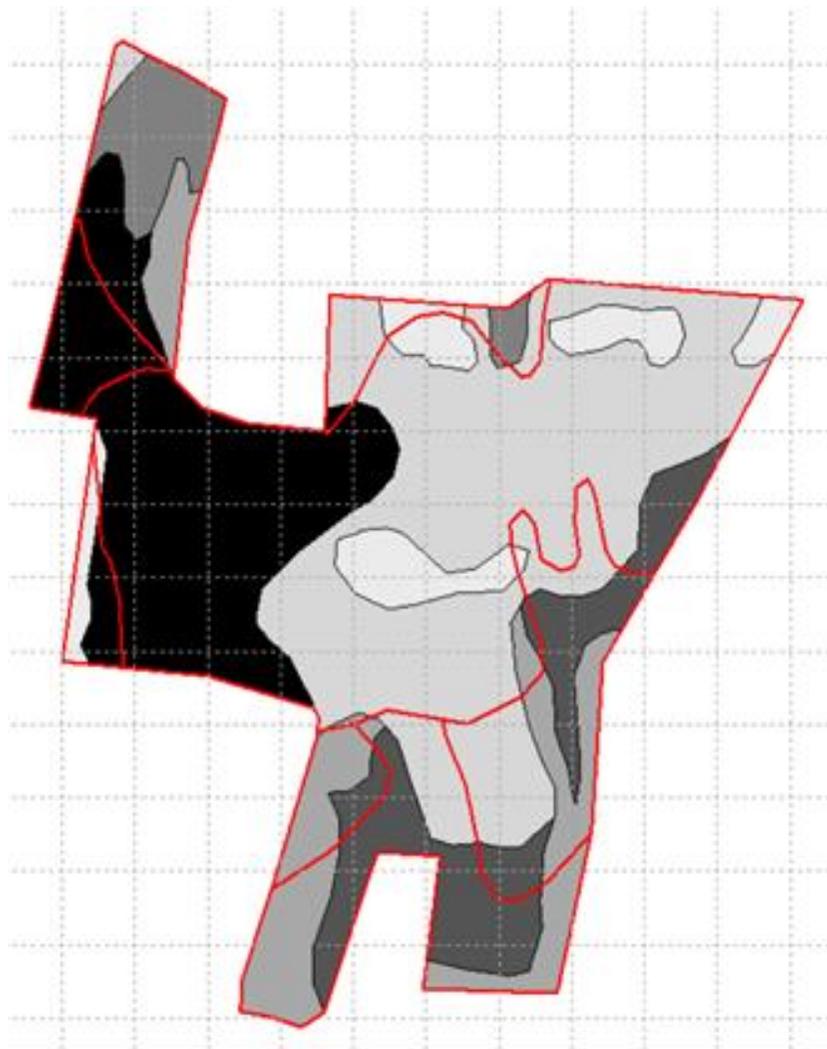
Эти карты являются обобщением и отражением текущего уровня знаний почвоведов о закономерностях географии почв того или иного региона или участка. В отличие от традиционно составляемых почвенных карт, карты АНП предназначены для решения прикладных задач сельскохозяйственного производства. Они являются прикладными, но создаются не путем анализа и оценки почв тех выделов, которые есть на почвенной карте (как это делается традиционно ([Ганжара и др., 1987](#))), а путем поиска про-

странственных неоднородностей воздействия лимитирующих свойств почв на посевы сельскохозяйственных культур на основе анализа данных дистанционного зондирования.

А



Б



В

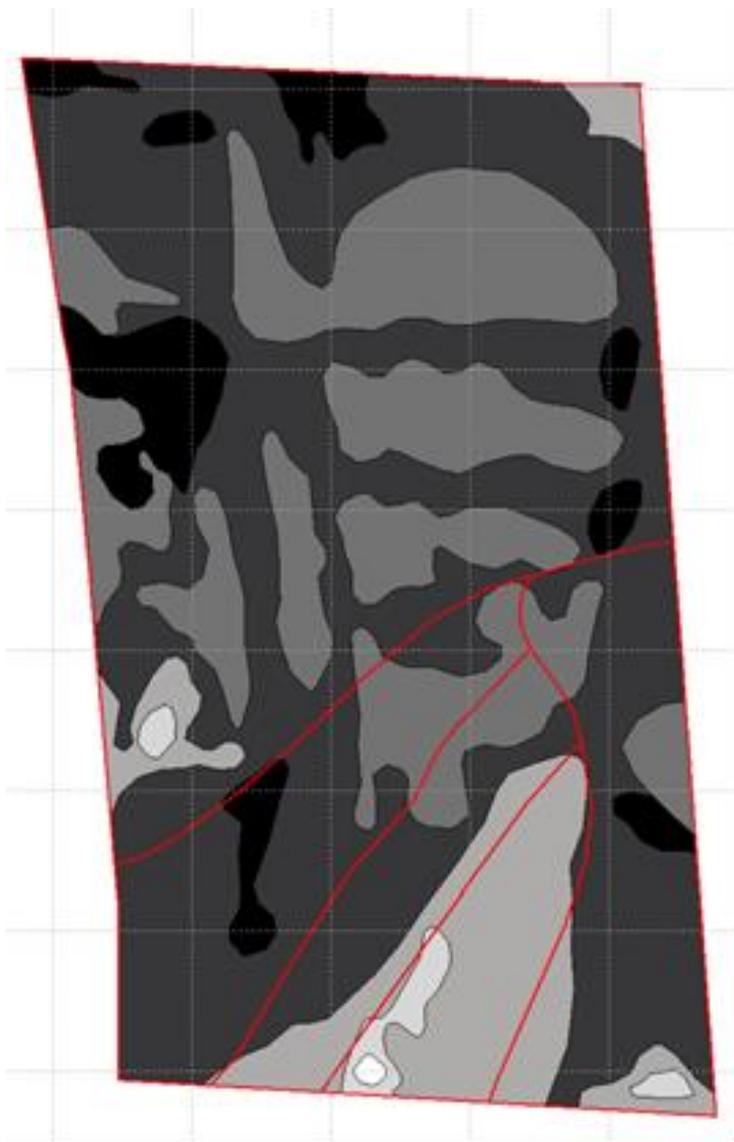


Рис. 3. Выделы карты АНП тестового поля “Меньково” (А), тестового поля “Стрелецкое” (Б) и тестового поля “Белокаменское” (В) (оттенки серого цвета) и границы выделов традиционно составленных почвенных карт (красные линии) (расстояние между серыми линиями грида – 100 м).

Fig. 3. ASSP (Agronomically Sound Soil Patterns) map sections of the Menkovo test field (A), Streletskoeye test field (B), and Belokamenskoye test field (C) (shades of gray) and boundaries of traditionally drawn soil maps (red lines) (distance between the gray grid lines is 100 m).

То есть в этом случае неоднородности почвенного покрова устанавливаются косвенно – по реакции на них посевов.

Подход к выделению этих зон подспудно учитывает и уровень хозяйствования. Те неоднородности почв, влияние которых на состояние посевов элиминируется какими-либо агротехническими мероприятиями, на картах АНП не отражаются. Таким образом, предложенный подход учитывает и специфику использования земель, тот севооборот и те агротехнологии, которые используются на конкретном земельном участке.

Анализ связи состояния посевов с неоднородностями почвенного покрова проводится уже давно ([Фридланд, 1972](#); [Прохова, Сорокина, 1975](#); [Прудникова, Савин, 2013](#)), но до сих пор не предлагалось использовать анализ состояния посевов как основу для картографирования агрономически важных свойств почв. В целом данный подход является развитием идей такого научного направления как индикационная геоботаника ([Викторов и др., 1962](#); [Маханова и др., 2010](#)), но применительно к сельскохозяйственной растительности.

Кроме того, предложенный подход близок к работам последних лет в области научного обоснования внедрения систем точного земледелия ([Maloku et al., 2020](#)). В рамках этих подходов также не используется традиционно созданная почвенная карта, а проводится анализ пространственной неоднородности посевов на поле (на основе датчиков, установленных на комбайнах ([Morais et al., 2021](#)) или в поле ([Placidi et al., 2021](#)), или с использованием данных дистанционного зондирования ([Савин, Блохин, 2022](#))),

который и служит основой для планирования агротехнических мероприятий и управлением плодородия почв поля.

В отличие от подходов точного земледелия, в предложенном подходе в основе анализа все же лежат почвенные свойства и их пространственное варьирование. Это позволяет учитывать весь набор лимитирующих свойств почв с учетом специфики их влияния на посевы разных культур и в разные сезоны вегетации. В рамках подходов точного земледелия обычно учитываются лишь те ограниченные свойства, которые могут быть измерены современными датчиками (влажность, электропроводность, плотность и некоторые другие ([Viscarra Rossel, Bouma, 2016](#))). Учитывается лишь состояние измеряемых свойств почв и посевов на момент измерения, без учета многолетней и сезонной динамики. Это связано с разницей в целеполагании этих подходов. В точном земледелии основная цель является более оперативной: выявить пространственные неоднородности и попытаться их быстро устранить (например, выровнять состояние посевов), то в предложенном нами подходе основная цель – это выявление неоднородностей, которые устойчивы во времени, чтобы их учитывать при использовании земельного участка. В перспективе эти подходы могут быть инкорпорированы в технологии точного земледелия, что позволит расширить функциональные возможности этих технологий.

Особенностью предложенного подхода является то, что в выделах карты АНП на данном этапе невозможно указать какой-то объект картографирования, так как объектом фактически является набор лимитирующих свойств почв и особенности их влияния на посевы. Поэтому основным тематическим наполнением карты является атрибутивная таблица к ней, в которой перечислены свойства и их лимитирующее воздействие. Карты АНП индивидуальны для каждого поля и должны обновляться (корректироваться) при смене специфики землепользования. Лишь при накоплении таких карт с атрибутивными данными можно будет перейти к классификации отраженных на картах объектов с целью получения прикладной классификации почв для сельскохозяйственных целей.

ВЫВОДЫ

Предложен новый подход к созданию карт, отражающих пространственное варьирование агрономически значимых свойств почв на поле. Предложенный подход позволяет более точно отражать неоднородности почвенного покрова поля, важные для сельскохозяйственного производства, чем традиционные подходы, что подтверждается сравнением выделов карт АНП с выделами традиционно составленных почвенных карт. Процесс выделения зон неоднородностей основан на анализе архивов спутниковых данных, что предопределяет его оперативность, точность и технологичность, а также возможности в перспективе его полной автоматизации.

Теоретически подход может использовать и архивы данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов, что еще больше повысит его точность. Но для этого необходимо накопление данных подобной съемки на территорию отдельных полей и проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов С.В., Востокова Е.А., Вышивкин Д.Д.* Введение в индикационную геоботанику. М.: Наука, 1962. 232 с.
2. *Ганжара Н.Ф., Зайдельман Ф.Р., Кауричев И.С., Кашанский А.Д., Коротков А.А., Кочубей М.С., Крупеников И.А., Люжин М.Ф., Поддубный Н.Н.* Составление и использование почвенных карт. М.: Агропромиздат, 1987. 273 с.
3. *Докучаев В.В.* Итоги о русском черноземе // Тр. Вольн. эконом. об-ва. 1877. Т. 1. Вып. 4. С. 415–432.
4. *Кириянова Е.Ю., Савин И.Ю.* Неоднородность посевов, определяемая по спутниковым данным MODIS, как индикатор контрастности почвенного покрова // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 3. С. 36–39.
5. *Козубенко И.С.* Почвенная информация в аналитическом центре Минсельхоза России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 3–15. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-3-15](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-3-15).
6. *Маханова Г.С., Дурницкая М.С., Радаева Ю.Г.* Методы индикационных исследований в геоботанике // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2010. № 3 (27–1). С. 218–219.

7. Методическое руководство “Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий” / Под ред. *В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова*. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2005. 794 с.
8. *Прохорова З.А., Сорокина Н.П.* Влияние компонентов элементарной структуры дерново-подзолистых почв на продуктивность сельскохозяйственных растений // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1975. Вып. 8. С. 178–191.
9. *Савин И.Ю.* Классификация почв и земледелие // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 3–9. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-84-3-9](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-3-9).
10. *Савин И.Ю.* Пространственные аспекты прикладного почвоведения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 5–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
11. *Савин И.Ю.* Перспективы развития картографирования и мониторинга почв на основе интерполяции точечных данных и дистанционных методов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2022. № 2. С. 13–19.
12. *Савин И.Ю., Блохин Ю.И.* Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей на пахотных угодьях // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 22–50. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-22-50](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-22-50).
13. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
14. *Савин И.Ю., Симакова М.С.* Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 9 (5). С. 104–115.
15. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования / гл. ред. *Иванов А.Л.* М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. 350 с.
16. *Толтин В.А., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Савин И.Ю., Флитман Е.В.* Возможности информационного сервера СДМЗ АПК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. № 7(2). С. 221–232.
17. *Фридланд В.М.* Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 423 с.
18. *A framework for land evaluation.* FAO Soils bulletin 32. Rome: FAO, 1976. 78 p.
19. *Asgari N., Ayoubi S., Demattê J.A.M., Jafari A., Safanelli J.L., Da*

- Silveira A.F.D.* Digital mapping of soil drainage using remote sensing, DEM and soil color in a semiarid region of Central Iran // *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 22. e00302. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00302](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00302).
20. *Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J.* Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the Global Agriculture Monitoring (GLAM) project // *Remote Sensing*. 2010. Vol. 2(6). P. 1589–1609. DOI: [10.3390/rs2061589](https://doi.org/10.3390/rs2061589).
21. *Bousbih S, Zribi M, Pelletier C, Gorrab A, Lili-Chabaane Z, Baghdadi N, Ben Aissa N, Mougenot B.* Soil Texture Estimation Using Radar and Optical Data from Sentinel-1 and Sentinel-2 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(13). 1520. DOI: [10.3390/rs11131520](https://doi.org/10.3390/rs11131520).
22. *Fischer H.S., Michler B., Ziche D., Fischer A.* Plants as Indicators of Soil Chemical Properties / *Wellbrock N., Bolte A.* (Eds) *Status and Dynamics of Forests in Germany* // *Ecological Studies*. 2019. Vol. 237. DOI: [10.1007/978-3-030-15734-0_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_10).
23. *Ge Y., Thomasson J., Sui R.* Remote Sensing of Soil Properties in Precision Agriculture: A Review // *Frontiers of Earth Science*. 2011. Vol. 5. P. 229–238. DOI: [10.1007/s11707-011-0175-0](https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0).
24. *Gleason C.J., Durand M.T.* Remote Sensing of River Discharge: A Review and a Framing for the Discipline // *Remote Sens*. 2020. Vol. 12. 1107. DOI: [10.3390/rs12071107](https://doi.org/10.3390/rs12071107).
25. *Karjalainen V., Tokola T., Malinen J.* Prediction of topsoil stoniness using soil type information and airborne gamma-ray data // *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. Vol. 52(1). P. 27–37. DOI: [10.1139/cjfr-2021-0001](https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0001).
26. *Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W.* Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Proc. of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 1969. P. 97–131.
27. *Lal R.* Societal value of soil carbon // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2014. Vol. 69(6). P. 186A–192A. DOI: [10.2489/jswc.69.6.186Aa](https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.186Aa).
28. *Manikandan K., Pandian K., Mariappan S., Devi G.* Concepts on land evaluation // *e-Journal Earth Science India*. 2013. Vol. 6. P. 20–26.
29. *Maloku D., Balogh P., Bai A., Gabnai Z., Lengyel P.* Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method // *International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE*. 2020. Vol. 11 (3). P. 232–242. DOI: [10.1556/1848.2020.00086](https://doi.org/10.1556/1848.2020.00086).
30. *Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E.A.* Versatile, low-power and low-cost IoT device for field data gathering in precision agriculture practices // *Agriculture*. 2021. Vol. 11. P. 619.
31. *Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A.* Global meta-analysis of the

- relationship between soil organic matter and crop yields // SOIL. 2019. Vol. 5. P. 15–32. DOI: [10.5194/soil-5-15-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019).
32. *Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A.* Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors // Sensors. 2021. Vol. 21. 5110. DOI: [10.3390/s21155110](https://doi.org/10.3390/s21155110).
33. *Qi Y., Qie X., Qin Q., Shukla M.K.* Prediction of soil calcium carbonate with soil visible-near-infrared reflection (Vis-NIR) spectral in Shaanxi province, China: soil groups vs. spectral groups // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol. 42:7. P. 2502–2516. DOI: [10.1080/01431161.2020.1854892](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1854892).
34. *Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 122–137. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).
35. *Serteser A., Kargioğlu M., İçağa Y.* Vegetation as an Indicator of Soil Properties and Water Quality in the Akarçay Stream (Turkey) // Environmental Management. 2008. Vol. 42. P. 764–770. DOI: [10.1007/s00267-008-9165-8](https://doi.org/10.1007/s00267-008-9165-8).
36. *The Aims of Land Evaluation.* 2019. URL: <https://sunnypapers.com/the-aims-of-land-evaluation-land-evaluation-is-concerned-with-the-present-land-performance/>.
37. *Viscarra Rossel R.A., Bouma J.* Soil sensing: A new paradigm for agriculture // Agricultural Systems. 2016. Vol. 148. P. 71–74. DOI: [10.1016/j.agsy.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001).
38. *Wang J, Peng J, Li H, Yin C, Liu W, Wang T, Zhang H.* Soil Salinity Mapping Using Machine Learning Algorithms with the Sentinel-2 MSI in Arid Areas, China // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(2). 305. DOI: [10.3390/rs13020305](https://doi.org/10.3390/rs13020305).
39. *Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M.* Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system // International Journal of Digital Earth. 2014. Vol. 7(2). P. 113–137. DOI: [10.1080/17538947.2013.821185](https://doi.org/10.1080/17538947.2013.821185).

REFERENCES

1. Viktorov S.V., Vostokova E.A., Vyshivkin D.D., *Vvedenie v indikacionnyu geobotaniku* (Introduction to indicative geobotanic), Moscow: Nauka, 1962, 232 p.
2. Ganzhara N.F., Zajdel'man F.R., Kaurichev I.S., Kashanskij A.D., Korotkov A.A., Kochubej M.S., Krupenikov I.A., Lyuzhin M.F., Poddubnyj N.N., *Sostavlenie i ispol'zovanie pochvennyh kart* (Compilation

- and use of soil maps), Moscow: Agropromizdat, 1987, 273 p.
3. Dokuchaev V.V., Itogi o russkom chernozyome (Conclusions about Russian chernozem), *Tr. Vol'n. ekonom. ob-va*, 1877, Vol. 1, Iss. 4, pp. 415–432.
 4. Kir'yanova E.Yu., Savin I.Yu., Neodnorodnost' posevov, opredelyaemaya po sputnikovym dannym MODIS, kak indikator kontrastnosti pochvennogo pokrova (Heterogeneity of soil cover, detected based on MODIS data, as an indicator of soil patterns contrast), *Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennyh nauk*, 2013, No. 3, pp. 36–39.
 - 40.5. Kozubenko I.S., Soil information in the analytical center of the ministry of agriculture of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 3–15, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-3-15](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-3-15).
 6. Mahanova G.S., Durnickaya M.S., Radaeva Yu.G., Metody indikacionnyh issledovanij v geobotanike (Methods of indicative investigations in geobotanic), *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, Vol. 3 (27-1), pp. 218–219.
 7. Kiryushina V.I., Ivanov A.L., *Metodicheskoe rukovodstvo "Agroekologicheskaya ocenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshaftnyh sistem zemledeliya i agrotekhnologij"* (Methodical manual "Agro-ecological land evaluation, planning of landscape adaptive land use systems, and agrotechnologies"), Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2005, 794 p.
 8. Prohorova Z.A., Sorokina N.P., Vliyanie komponentov elementarnoj struktury dernovo-podzolistyh pochv na produktivnost' sel'skohozyajstvennyh rastenij (Influence of sod-podzolic soil structure patterns on crop productivity), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, No. 8, pp. 178–191.
 9. Savin I.Yu., The classification of soils and agriculture, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 84, pp. 3–9, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-84-3-9](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-3-9).
 10. Savin I.Yu., Spatial aspects of applied Soil Science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 5–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
 11. Savin I.Yu., The trends of soil mapping and monitoring based on interpolation of point data and remote sensing methods, *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2022, Vol. 77, No. 2, pp. 62–66.
 12. Savin I.Yu., Blokhin Yu.I., On optimizing the deployment of an internet of things sensor network for soil and crop monitoring on arable plots, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 22–50, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-22-50](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-22-50).
 13. Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu., Sovremennye trendy i problemy pochvennoj kartografii (Modern trends and problems of soil cartography), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.
 14. Savin I.Yu., Simakova M.S., Sputnikovye tekhnologii dlya inventarizacii i monitoringa pochv v Rossii (Satellite technologies for soil inventory and

monitoring in Russia), *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 9 (5), pp. 104–115.

15. Ivanov A.L., *Cifrovaya pochvennaya kartografiya: teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital soil cartography: theoretical and experimental investigations), Moscow: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2012, 350 p.

16. Tolpin V.A., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Savin I.Yu., Flitman E.V., *Vozmozhnosti informacionnogo servera SDMZ APK* (Abilities of informative service SDMZ APK), *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 7(2), pp. 221–232.

17. Fridland V.M., *Struktura pochvennogo pokrova* (The structure of the soil cover), Moscow: Mysl', 1972, 424 p.

18. *A framework for land evaluation*, FAO Soils bulletin 32, Rome: FAO, 1976, 78 p.

41.19. Asgari N., Ayoubi S., Demattê J.A.M., Jafari A., Safanelli J.L., Da Silveira A.F.D., Digital mapping of soil drainage using remote sensing, DEM and soil color in a semiarid region of Central Iran, *Geoderma Regional*, 2020, Vol. 22, e00302, DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00302](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00302).

20. Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J., Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the Global Agriculture Monitoring (GLAM) project, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2(6), pp. 1589–1609, DOI: [10.3390/rs2061589](https://doi.org/10.3390/rs2061589).

21. Bousbih S., Zribi M., Pelletier C., Gorraab A., Lili-Chabaane Z., Baghdadi N., Ben Aissa N., Mougénot B., Soil Texture Estimation Using Radar and Optical Data from Sentinel-1 and Sentinel-2, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(13), 1520, DOI: [10.3390/rs11131520](https://doi.org/10.3390/rs11131520).

22. Fischer H.S., Michler B., Ziche D., Fischer A., Plants as Indicators of Soil Chemical Properties, In: Wellbrock N., Bolte A. (Eds) *Status and Dynamics of Forests in Germany*, *Ecological Studies*, 2019, Vol. 237, DOI: [10.1007/978-3-030-15734-0_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_10).

23. Ge Y., Thomasson J., Sui R., Remote Sensing of Soil Properties in Precision Agriculture: A Review, *Frontiers of Earth Science*, 2011, Vol. 5, pp. 229–238, DOI: [10.1007/s11707-011-0175-0](https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0).

24. Gleason C.J., Durand M.T., Remote Sensing of River Discharge: A Review and a Framing for the Discipline, *Remote Sens.*, 2020, Vol. 12, 1107, DOI: [10.3390/rs12071107](https://doi.org/10.3390/rs12071107).

42.25. Karjalainen V., Tokola T., Malinen J., Prediction of topsoil stoniness using soil type information and airborne gamma-ray data, *Canadian Journal of Forest Research*, 2021, Vol. 52(1), pp. 27–37, DOI: [10.1139/cjfr-2021-0001](https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0001).

26. Krieglér F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W., Preprocessing

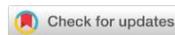
- transformations and their effects on multispectral recognition, *Proc. of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1969, pp. 97–131.
- 43.27. Lal R., Societal value of soil carbon, *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, Vol. 69(6), pp. 186A–192A, DOI: [10.2489/jswc.69.6.186Aa](https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.186Aa).
28. Manikandan K., Pandian K., Mariappan S., Devi G., Concepts on land evaluation, *e-Journal Earth Science India*, 2013, Vol. 6, pp. 20–26.
29. Maloku D., Balogh P., Bai A., Gabnai Z., Lengyel P., Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method, *International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE*, 2020, Vol. 11(3), pp. 232–242, DOI: [10.1556/1848.2020.00086](https://doi.org/10.1556/1848.2020.00086).
30. Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E.A., Versatile, low-power and low-cost IoT device for field data gathering in precision agriculture practices, *Agriculture*, 2021, Vol. 11, 619.
31. Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A., Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields, *Soil*, 2019, Vol. 5, pp. 15–32, DOI: [10.5194/soil-5-15-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019).
32. Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A., Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors, *Sensors*, 2021, Vol. 21, 5110, DOI: [10.3390/s21155110](https://doi.org/10.3390/s21155110).
33. Qi Y., Qie X., Qin Q., Shukla M.K., Prediction of soil calcium carbonate with soil visible-near-infrared reflection (Vis-NIR) spectral in Shaanxi province, China: soil groups vs. spectral groups, *International Journal of Remote Sensing*, 2021, Vol. 42:7, pp. 2502–2516, DOI: [10.1080/01431161.2020.1854892](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1854892).
34. Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 122–137, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).
44. 35. Serteser A., Kargoğlu M., Içağa Y. Vegetation as an Indicator of Soil Properties and Water Quality in the Akarçay Stream (Turkey), *Environmental Management*, 2008, Vol. 42, pp. 764–770, DOI: [10.1007/s00267-008-9165-8](https://doi.org/10.1007/s00267-008-9165-8).
36. *The Aims of Land Evaluation*, 2019, URL: <https://sunnypapers.com/the-aims-of-land-evaluation-land-evaluation-is-concerned-with-the-present-land-performance/>.
37. Viscarra Rossel R.A., Bouma J., Soil sensing: A new paradigm for agriculture, *Agricultural Systems*, 2016, Vol. 148, pp. 71–74, DOI: [10.1016/j.agsy.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001).
38. Wang J, Peng J, Li H, Yin C, Liu W, Wang T, Zhang H., Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the Sentinel-2 MSI in arid

areas, China, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(2), Vol. 305, DOI: [10.3390/rs13020305](https://doi.org/10.3390/rs13020305).

39. Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system, *International Journal of Digital Earth*, 2014, Vol. 7(2), pp. 113–137, DOI: [10.1080/17538947.2013.821185](https://doi.org/10.1080/17538947.2013.821185).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-58-89



Ссылки для цитирования:

Тимофеева М.В., Абросимов К.Н., Юдина А.В., Фомин Д.С., Ключева В.В. Зимография: особенности постановки метода визуализации активности ферментов в почвах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 58-89. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-58-89

Cite this article as:

Timofeeva M.V., Abrosimov K.N., Yudina A.V., Fomin D.S., Klyueva V.V., Zymography: developing of the enzyme soil activity visualization method, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 113, pp. 58-89, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-58-89

Благодарность:

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых кандидатов наук на 2021–2022 гг. МК-5913.2021.5 и гранта РФФИ №19-29-05260.

Acknowledgments:

The study was financed by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young candidates of sciences for 2021–2022 No. МК-5913.2021.5 and by the RFBR (Russian Foundation for Basic Research) grant No. 19-29-05260.

Зимография: особенности постановки метода визуализации активности ферментов в почвах

© 2022 г. М. В. Тимофеева*, К. Н. Абросимов,
А. В. Юдина, Д. С. Фомин, В. В. Ключева

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*e-mail: mtimofeeva02@gmail.com.

Поступила в редакцию 10.11.2022, после доработки 08.12.2022,
принята к публикации 27.12.2022

Резюме: Ферменты, продуцируемые почвенной биотой, являются ключевым звеном в регуляции биохимических процессов. Активность ферментов в почве может быть визуализирована с помощью зимографии – метода, основанного на применении флуоресцирующих субстратов и

позволяющего получать двумерные изображения (зимограммы). Авторами предложен вариант зимографической установки, представлены параметры освещения, фотоаппаратуры и режимов съемки, подготовка реактивов и калибровка. На примере контрастных по гранулометрическому составу почв (песок и тяжелый суглинок) детально описаны процессы подготовки образцов к анализу и сам анализ. Рассмотрены различные варианты внесения субстрата: раскапывание, окунание, насыщение, также проведена оценка влияния длительности инкубирования образцов на качество получаемых изображений. Оценены возможности и недостатки метода, предложены варианты решения методических проблем, возникающих в процессе анализа. Зимография – перспективный метод, позволяющий сопоставить данные с результатами других методов. Использование нейросетевых технологий позволяет с высокой достоверностью получить объемное распределение почвенных ферментов. Зимография требует качественно проделанной подготовительной работы и предельной аккуратности при проведении анализа. Необходимо обеспечить максимальный контакт между субстратом и почвой, так как это один из ключевых факторов, определяющих качество результатов. Установлено, что наиболее оптимальным способом внесения субстрата является насыщение мембран в растворе на протяжении 60 минут. На данном этапе развития метода нет возможности установить универсальное время инкубирования образцов, так как оно зависит от ряда характеристик как исследуемой почвы, так и условий проведения зимографии. При презентации результатов метода необходимо детально документировать условия его проведения.

Ключевые слова: β -глюкозидаза, зимограммы, зимографическая установка, methylumbelliferone.

Zymography: developing of the enzyme soil activity visualization method

© 2022 M. V. Timofeeva*, K. N. Abrosimov, A. V. Yudina,
D. S. Fomin, V. V. Klueva

*Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: mtimofeeva02@gmail.com.

Received 10.11.2022, Revised 08.12.2022, Accepted 27.12.2022

Abstract: The enzymes produced by the soil biota are a key link in the regulation of biochemical processes. The soil enzyme activity can be

visualized with zymography, a method based on using fluorescent substrates and obtaining two-dimensional images (zymograms). A variant of a zymographic measuring system has been proposed. Characteristics of lighting, photographic equipment and shooting modes, reagents preparation and calibration are presented. Preparing and analyzing soil samples of different texture (sand and clay loam) and processing the study results have been described. The ways of introducing the substrate are considered in this study, namely pipetting, short-time dipping, and saturation. An analysis of the kinetics of incubation of samples was carried out. The possibilities and disadvantages of the method were also considered and options for solving possible methodological problems during the analysis were proposed. The zymography is a promising method that allows comparing data with the results of other methods. The use of neural network technologies makes it possible to obtain the volumetric distribution of soil enzymes with high reliability. The soil zymography requires qualitative preparatory work and extreme accuracy during the analysis. It is necessary to ensure maximum contact between the substrate and the soil, as this is one of the key factors determining the quality of the results. The most optimal way to introduce the substrate is to saturate the membranes with substrate solution for 60 minutes. At this stage of the development of the method, it is not possible to establish a universal sample incubation time, since this depends on characteristics of both the studied soils and the experiment conditions. Also, it is necessary to document the conditions in detail for discussion the study results.

Keywords: β -glucosidase, zymogram, zymographic device, methylumbelliferone.

ВВЕДЕНИЕ

Ферментативная активность (ФА) почв – показатель функциональной активности почвенной биоты и ее способности к разнообразным биохимическим превращениям. Ферменты, продуцируемые почвенной биотой, являются ключевым звеном в регуляции всех биохимических процессов. Именно ферменты участвуют в переработке, стабилизации и дестабилизации органического вещества (ОВ) почв, круговороте элементов в наземных экосистемах, процессах самоочищения почвы ([Gramms et al., 1999](#); [Tabatabai, Dick, 2002](#); [Burns et al., 2013](#); [Steinweg et al., 2013](#)). Общая ферментативная активность почв складывается из трех типов ФА: 1) внутриклеточной; 2) внеклеточной, ассоциированной с почвенными коллоидами; 3) внеклеточной, обусловленной фер-

ментами, находящимися свободно в почвенном растворе. Вклад каждого из этих трех компонентов в общую активность значительно меняется со временем, зависит от типа почвы, от конкретного фермента ([Burns, 1977](#)).

Обычно ферменты измеряют, наблюдая за исчезновением специфичного для них субстрата или за появлением продуктов его распада. Анализы, проводимые в почвенных суспензиях (enzyme assays), измеряют “максимальный потенциал” ферментативной активности почвы ([Burns, 1977](#); [Tabatabai, Dick, 2002](#); [Wallenstein, Weintraub, 2008](#)), так как оценивают все типы ФА, выделенные из взятого для анализа объема почвы. Почвенная зимография – молекулярный метод, позволяющий количественно оценить распределение активности ферментов в срезе почвы и визуализировать ее *in situ* ([Razavi et al., 2019](#)). Зимография не заменяет классический анализ, так как отражает ФА, связанную с поверхностью конкретного среза образца, а не со всем его объемом ([Baldrian, Větrovský, 2012](#)). Активность, обнаруживаемая методом почвенной зимографии, обычно приписывается внеклеточным ферментам, выделяемым корнями или микроорганизмами, которые либо иммобилизованы без потери реакционной способности на поверхности частиц твердой фазы, либо присутствуют в почвенном растворе в свободной форме ([Gianfreda, Bollag, 1994](#); [Rao et al., 2000](#)).

Зимография основана на детекции в ультрафиолете флуоресцентного соединения, образующегося при реакции субстрата со специфичным для него ферментом. На поверхность образца почвы помещают мембрану, пропитанную фермент-специфическим флуоресцентным субстратом. Субстрат состоит, как правило, из органической молекулы, которая связана с флуоресцентной меткой. При контакте субстрата со специфическим почвенным ферментом происходит гидролиз ([Dong et al., 2007](#)), и высвобождается флуоресцирующее соединение (рис. 1.). Его концентрация на мембране соответствует степени яркости и фиксируется в УФ-свете. Получившаяся картина отражает пространственное распределение активных ферментов на поверхности почвы и называется зимограммой.

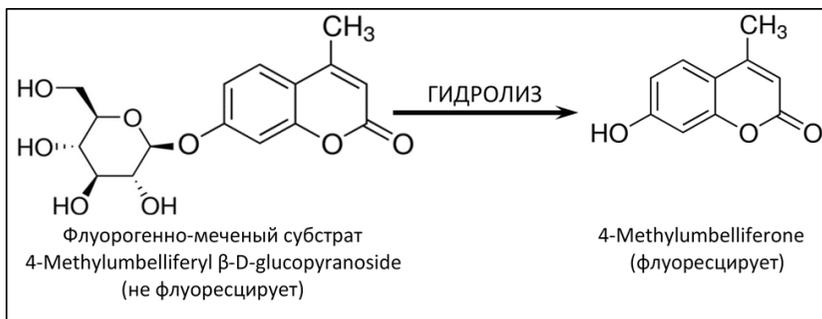


Рис. 1. Высвобождение флуоресцирующей молекулы в зимографии.
Fig. 1. Release of fluorescent product during soil zymography.

Для пересчета зимограмм в количественные данные необходима калибровочная кривая, получаемая на основе растворов с известной концентрацией флуоресцирующего вещества. Для этого делают цифровой фотоснимок мембранных фильтров, пропитанных раствором точно известной концентрации, а затем его переводят в графическом редакторе в оттенки серого.

Впервые для почв данный метод предложен в лаборатории Университета Гёттингена в 2013 г. ([Spohn et al., 2013](#)). Хотя попытки визуализировать почвенную ФА с помощью флуоресцентно-меченых субстратов предпринимались и до этого ([Baldrian, Větrovský, 2012](#)). Отметим, что первоначально использовали электрофорезный гель или агар, в которые замешивали флуоресцентно-меченый субстрат. Протокол, которым сегодня пользуются ученые по всему миру, разработала группа исследователей из Германии. Переломным моментом стало использование мембранных фильтров вместо геля ([Spohn, Kuzyakov, 2013](#); [Sanaullah et al., 2016](#); [Razavi et al., 2016](#)), что поспособствовало популяризации метода и его распространению.

Большинство опубликованных исследований, в которых используется зимография почв, написано сотрудниками лаборатории Университета Геттингена, где был поставлен метод, или совместно с ними. Они рассматривают технические особенности метода ([Guber et al., 2018](#); [Guber et al., 2021](#)), совмещение зимограмм с

результатами других анализов, дающих пространственное распределение свойств (например, с данными компьютерной томографии ([Kravchenko et al., 2019a](#)), ^{14}C -визуализацией и нейтронной радиографией ([Bilyera et al., 2021](#))), применимость метода для изучения микробной активности ([Ge et al., 2017](#)) и биологических циклов элементов (например, цикла углерода) ([Kravchenko et al., 2019b](#)). Сегодня зимография активно применяется для изучения ФА почв учеными из разных стран ([Duan et al., 2018](#); [Giles et al., 2018](#); [Heitkötter, Marschner, 2018](#); [Cao et al., 2022](#)).

В России на текущий момент использование зимографии не распространено. Хотя изучение биологической активности органических ([Инишева и др., 2003](#); [Ефремова, Овчинникова, 2008](#)) и минеральных ([Девятова, 2006](#); [Даденко и др., 2009](#); [Каширская и др., 2020](#)) почв с использованием классической ФА ведется давно ([Хазиев, 1990](#)).

В данной статье мы обобщили опыт постановки и использования зимографии почв, накопленный в лаборатории физики и гидрологии почв Почвенного института имени В.В. Докучаева. Описание зимографической установки и протокол, приведенные в статье, позволят воспроизвести метод в других почвенных лабораториях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Конструкция зимографической установки

В настоящее время коммерчески доступных решений зимографических установок для исследования почв не существует. В каждом из опубликованных на сегодняшний день исследований авторы использовали самодельные конструкции из сочетания бытового и лабораторного оборудования. Учитывая их опыт, мы решили сделать собственную установку, которая бы позволяла работать с партией образцов одновременно и с образцами разного размера (от единиц до десятков см).

По своей сути зимографическая установка очень близка к конструкциям, используемым для предметной рекламной фотографии, с той разницей, что фотокамера нацелена на предмет съемки сверху вниз под прямым углом и зафиксирована, а для равномерного освещения используются ультрафиолетовые лампы.

При конструировании установки мы старались избежать неоправданных расходов без гарантии заметно лучшего результата. Зимографическая установка сделана на основе лабораторной тяги габаритами 120 × 60 × 80 см. Тяга обеспечивает удаление мелкой пыли во время работы, которая может зашумлять получаемые в УФ изображения. Фотокамера расположена над геометрическим центром рабочей области. В качестве жесткого крепления камеры к стене использовали стальные уголки с ребром жесткости. Возможность вертикального перемещения камеры ± 5 см обеспечивается штативной головкой для макросъемки. По сторонам от нее на равном удалении от препарата расположены УФ-светильники, закрепленные на раму из ПВХ-труб. Для минимизации влияния отраженных УФ-лучей на результаты фотосъемки вся рабочая область окрашена черной матовой краской “BLACK 2.0” (Stuart Semple, Великобритания) с максимальной способностью к поглощению УФ-излучения. Управление фотокамерой осуществляется с помощью ноутбука через штатное ПО по USB.

Освещение

Использовали два варианта УФ-светильников: 1) на основе четырех газоразрядных ламп из черного стекла “FOTON 9W G23”, выстроенных квадратом вокруг оси фотокамера – препарат (рис. 2); 2) на основе четырех светодиодных модулей мощностью 10W, но расположенных параллельно друг другу и на равном удалении от препарата (рис. 3).

В исследовании Spohn, Kuzyakov (2014) применяли УФ-лампы с длиной волны УФ-излучения 365 нм. Мы использовали аналогичные по максимуму излучения светильники.

Следует отметить, что светодиодные модули за счет направленного потока света значительно эффективнее газоразрядных ламп. Кроме того, производство ламп из черного стекла в мире в последние годы сокращается, а их стоимость возрастает. На момент конструирования установки их уже было непросто приобрести, в отличие от повсеместно распространенных диодных модулей.

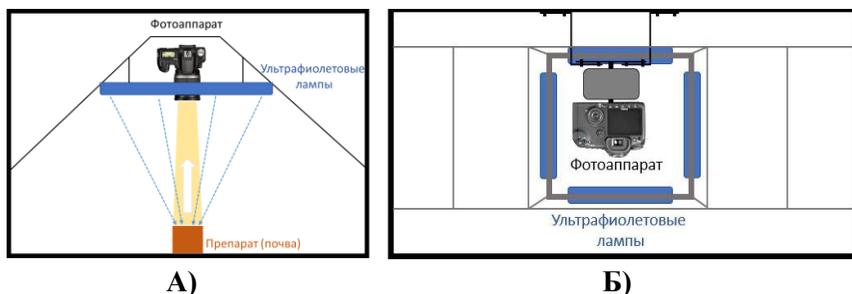


Рис. 2. Расположение газоразрядных ламп в зимографической установке. А) Вид сбоку; Б) Вид сверху.

Fig. 2. Arrangement of the gas-discharge lamps in the zymographic device. А) Side view; Б) Top view.

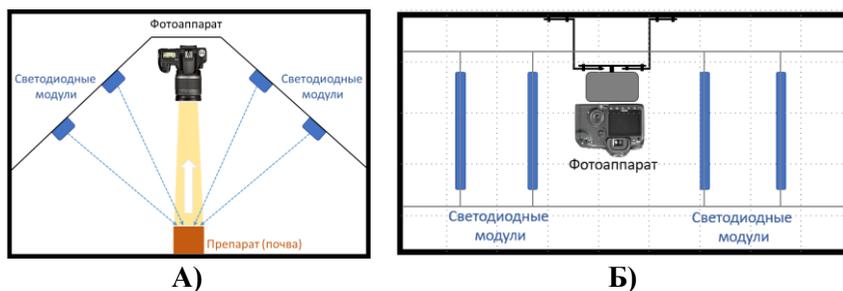


Рис. 3. Расположение светодиодных ламп в зимографической установке. А) вид сбоку; Б) вид сверху.

Fig. 3. Arrangement of LED lamps in the zymographic device. А) Side view; Б) Top view.

Фотокамера и рекомендуемая оптика

Для стационарной зимографической установки фотокамера – центральное звено. Ей необходимо обладать рядом особенностей: 1) возможность удаленного управления с ПК или планшета через соответствующее приложение; 2) жесткая фиксация и неподвижность во время срабатывания затвора (подъема зеркала), т. е. камера как минимум должна иметь возможность крепления к штативу; 3) возможность подключения тросика для интервальной фотосъемки; 4) возможность сохранения данных в несжатый графич-

ческий формат данных (RAW). Набору этих параметров соответствует довольно много цифровых камер профессионального и полупрофессионального класса. Нами был выбран для работы цифровой зеркальный фотоаппарат Canon EOS 50D, соответствующий вышеперечисленным параметрам.

Из-за различных габаритов препаратов (диаметр и высота) меняется дистанция фокусировки. Это следует учитывать, иначе можно потерять возможность съемки некоторых образцов, поверхность которых будет слишком близко к передней линзе объектива, – может не хватить дистанции фокусировки. Для этого очень удобно использовать специализированные макрообъективы, спроектированные для съемки вблизи.

Для съемки образцов диаметром от 2.5 до 7 см мы использовали светосильные объективы: Зенитар 50/1.2 для 7 см и Калейнар 150/2.8Б с переходником и макрокольцами для 2.5 см. Автофокусные объективы для зумографической установки совершенно не нужны, как и оптика со стабилизацией изображения. Использование зум-объектива с низкой светосилой ([Guber et al., 2018](#)) представляется сомнительным из-за проблемы цифровых шумов изображения. Светосильная оптика позволяет фотографировать на более коротких выдержках и с использованием более низкой светочувствительности, что ухудшает чистоту изображений и увеличивает уровень цифрового шума.

Режим съемки и настройки камеры

В результате съемки необходимо получить серию с одинаковыми настройками и уровнем цифровых шумов. Для этого придется полностью исключить любое влияние автоматики цифровой камеры и использовать только ручные настройки съемки. У абсолютного большинства моделей – это режим “М”.

Настройка фотокамеры в ручном “М” режиме. Мы использовали следующие настройки:

- ISO (светочувствительность) – 400,
- выдержка 1/50,
- диафрагма 2.8,
- баланс белого – в ручном режиме, 6500К,

– вспышка принудительно отключена.

Фотографии мы сохраняли в RAW формат (CR2 для камер Canon). Этот формат благодаря 14-bit процессору фотокамеры позволяет сохранять и обрабатывать в 4 раза больше цветовых оттенков, чем BMP или JPEG максимального качества. Управление съемкой, настройками и сохранением файлов осуществляли удаленно с ноутбука по USB-проводу с помощью фирменного ПО Canon EOS Utility.

Перед проведением работ следует учитывать ряд нюансов фотосъемки. *Резкость изображения* (микродетальность) можно регулировать диафрагмой. Обычно на диафрагме 1.2 резкость заметно ниже, чем в диапазоне 2.8–5.6, где она максимальна. Именно по этой причине мы стараемся открытую диафрагму не использовать. Впрочем, диапазон максимальной микрорезкости индивидуален для каждого объектива, и может быть смещен до 8–11 для недорогих зум-объективов любительского класса. *Выдержка* не должна быть излишне длинной, чтобы свести к минимуму вероятность смазывания изображения при подъеме зеркала и/или срабатывании затвора камеры. Считается, что длина выдержки не должна быть меньше фокусного расстояния объектива: для 50 мм фокусного расстояния – не длиннее 1/50, для 150 мм – не длиннее 1/150. Кроме того, при работе на коротких выдержках цифровых шумов проявляется заметно меньше, чем на длинных.

Стабилизатор изображения (при его наличии) необходимо отключить. Оптический стабилизатор при выдержках короче 1/30 не помогает, а наоборот вредит результату появлением эффекта “дрейфа линз” когда изображение выглядит неравномерно смазанным. Цифровой – позволяет увеличить значения ISO, что грозит усилением цифровых шумов.

Значения ISO желательно излишне не завышать. ISO – это программное усиление сигнала, поступающего от ПЗС-датчика (цифровой матрицы камеры). При высоких значениях ISO на фотографиях наблюдается обилие цифрового шума. Даже на более современных моделях фотокамер мы рекомендуем ограничиться ISO равным 400.

Подготовка реактивов

Для проведения зимографии необходим синтетический фермент-специфичный флуоресцентно-меченый субстрат. Принцип метода основан на том, что в процессе эксперимента субстрат, связанный с 4-метилумбеллифероном (МУФ), истощается, и выделяется МУФ, флуоресценция которого затем измеряется.

Для постановки метода зимографии использовали субстратный раствор β -глюкозидазы (4-Methylumbelliferyl β -D-glucopyranoside), раствор метилумбеллиферона (4-Methylumbelliferone, MUF), выступающего в качестве конечного флуоресцирующего агента, MES-буфер и диметилсульфоксид (использовались реагенты производства фирмы Sigma Aldrich). Выбор субстрата обусловлен тем, что β -глюкозидаза является важным ферментом при рассмотрении углеродного цикла почв, так как отвечает за разложение целлюлозы ([Alkorta et al., 2003](#)) и является одним из наиболее распространенных ферментов в почве.

Приготовление всех растворов необходимо осуществлять на основе стерильной воды одинаковой температуры во избежание ошибок разведения, связанных с изменением объема воды. Массу порошка субстрата отмеряют с точностью до десятитысячных. Все отборы реактивов для растворов проводили на одних и тех же аналитических весах (OHAUS Explorer EX124/AD000000). Посуда для работы – приготовления растворов – должна быть стерилизована автоклавированием (15 минут, 120 °C).

Для проведения анализов использовали раствор субстрата β -глюкозидазы с концентрацией 10 мМ ([Spohn, Kuzyakov, 2014](#)), для чего навеску в количестве 1/10 000 молекулярной массы (0.0338 г) субстрата растворяли в 300 мкл диметилсульфоксида и доливали 9.7 мл стерильной воды. Диметилсульфоксид необходим ввиду низкой растворимости порошка субстрата в воде. Перед запуском зимографии мы провели подготовительную работу с несколькими вариантами концентраций и установили указанную как наиболее подходящую для изучаемых образцов. Во время работы необходимо контролировать, чтобы раствор субстрата был истинным, без взвеси или выпадения осадка. При необходимости для растворения образовавшегося осадка необходимо использовать вихревые смесители типа Вортекс. Раствор 10 мМ MUF готовили на основе

метилового спирта и стерильной воды, раствор 0.1 М MES-буфера – исключительно на основе стерильной воды. MES-буфер характеризовался величиной рН равной 6.5 ед.

Хранению реактивов как в виде порошков, так и в виде растворов необходимо уделять особое внимание. Сухой порошок субстрата β -глюкозидазы необходимо хранить в морозильной камере при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в рамках указанного производителем срока годности. Раствор субстрата (10 мМ) хранят в замороженном виде при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ не более 6 месяцев. При работе с субстратным раствором комнатной температуры во время проведения экспериментов необходимо держать его в темноте. Порошки MES и MUF хранятся в темном и сухом месте при комнатной температуре также в рамках указанного срока годности, растворы MES и MUF – в холодильнике в темной посуде или завернутыми в фольгу при $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение одного месяца.

Калибровка

Для калибровки использовали 9 растворов MUF с концентрацией 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 мМ. Мембранные фильтры с нанесенным раствором фотографировали в УФ-свете. На основе калиброванных данных строится прямая зависимости суммарной яркости изображения от концентрации MUF. Результаты позволяют пересчитать яркость каждого пикселя в концентрацию MUF.

ПРОВЕДЕНИЕ ЗИМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Подготовка почвенных микрокосмов к зимографии

Зимография почв активно применяется для изучения активности ферментов в ризосфере и биопорах *in situ*, в том числе в полевых условиях ([Razavi et al., 2017](#)). В этом случае подготавливаются специальные контейнеры, в которых проращиваются растения, – ризобоксы, и зимограмму получают на одной из его сторон с почвой и корнями растения, после удаления стенки ризобокса. Или используется свежезачищенная стенка почвенного разреза. То есть мембранный фильтр кладется непосредственно на открытую сторону образца почвы. В своих исследованиях мы использовали сконструированные микрокосмы и монолиты, которые использо-

вались в инкубационных экспериментах, и определяли зимографию послойно. В качестве сосудов для микрокосмов использовали ПВХ-контейнеры цилиндрической формы объемом 373 мл ($h = 9.7$ см, $d = 7.9$ см) с плотно закрывающимися крышками.

Для отработки методики и уточнения спорных методических моментов использовали насыпные образцы. Тут были выбраны контрастные по гранулометрическому составу средние почвенные образцы: песок (горизонт АО, подзол типичный, Тверская область), тяжелый суглинок (горизонт АУ, серая лесная почва, Тульская область). Образцы гомогенизировали, пропустив через сито 3.2 мм, и из них собирали насыпные варианты в чашки Петри ($d = 2.5$ см, $h = 0.5$ см), в которых проводили отработку методики. Перед проведением зимографии все почвы инкубировали при температуре $+24$ °С и влажности 60% от ППВ: микрокосмы – в течение 180 дней, насыпные образцы – в течение 7 дней.

Подробно остановимся на специфике работы с описанными типами почвенных образцов. При высоте почвенного образца около 6.5 см мы определяли ферментативную активность в 4-х слоях, через каждые 1.5–3.0 см. Отсчет изучаемых слоев удобно вести от дна, т. е. первый слой – самый глубокий, поэтому в рабочем положении микрокосм был перевернут (рис. 4).

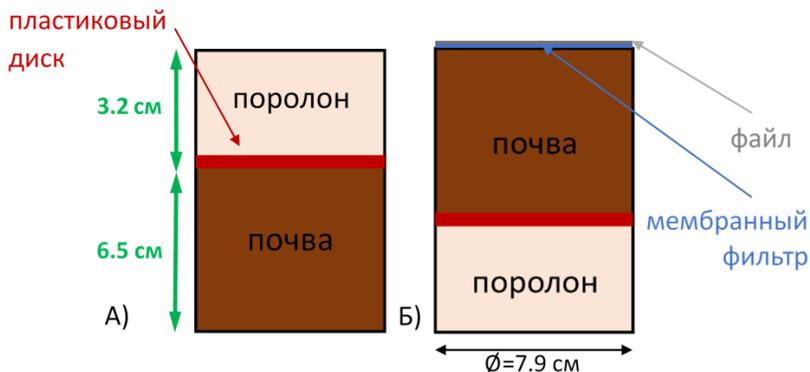


Рис. 4. Положение микрокосмов во время инкубации и во время работы.
Fig. 4. Microcosms position during incubation and operating time.

При послойном исследовании приходится постепенно выдавливать почву из сосуда, частично срезая ее для высвобождения нового слоя для исследований. Удобно начинать работать с нижней стороны микрокосма, поэтому перед работой у контейнера срезали дно. В микрокосм на поверхность почвы клали диск из плотного материала (пластик), на него – прокладочный материал (поролон), далее закрывали стакан крышкой. Количество прокладочного материала – важный фактор, так как он обеспечивает стабильность почвенного образца в микрокосме во время работ. И, если положить поролона недостаточно, почва в стакане будет проваливаться при переворачивании стакана, а если положить материала больше необходимого, поролон вытолкнет почву. И в первом, и во втором случае это грозит нарушением естественного сложения микрокосма и появлением трещин, что создает трудности для проведения анализа и интерпретации результатов. По мере выдавливания почвы ее объем уменьшался. Поэтому для компенсации потери этого объема добавляли поролон в объеме, равном объему выдавленной почвы. В начале работы в сосудах для микрокосмов было 6.5 см почвы и 3.2 см поролона, к концу работы – около 1.5–2 см почвы и 7.5–8 см прокладочного материала.

Во время резки мы столкнулись с рядом сложных моментов. Во-первых, нож при обрезании дна может повредить структуру исследуемой почвы. Во избежание этого мы не срезали почвенный слой вместе с дном, а только обрезали стенки ПВХ-сосуда, чтобы можно было снять дно. Во-вторых, при обрезке контейнера возникает некоторое количество ПВХ-опилок, которые ярко светятся в УФ-свете и создают помехи при дальнейшей работе. Мы использовали циркулярную пилу со скоростью 6 600 об./мин и диск по дереву с мелким зубом. Такой способ практически не создает опилок – они плавятся или выбрасываются вращающимся диском за пределы рабочей области. Важно следить за тем, чтобы диск не повредил почвенный образец. В-третьих, после обрезки по краям контейнера иногда мы все же наблюдали оплавления ПВХ, которые светятся в УФ и мешают дальнейшей работе. Удаляли эти обрезки кусачками или острым канцелярским ножом.

Подготовленный таким образом образец вставляли в *выдавливающее устройство авторской конструкции*, которое представ-

ляет собой скелетный пистолет для герметика со стенками для удерживания ПВХ-сосуда (рис. 5). Во избежание нарушения почвы в микрокосме во время работы сосуд для микрокосмов дополнительно фиксировали в пистолете. Для этого в стенках сосуда делали отверстия при помощи дремеля и закрепляли микрокосм в выдавливающем устройстве в неподвижном положении с помощью шурупа-кольца.

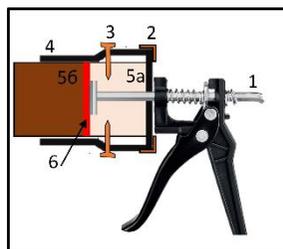


Рис. 5. Схема выдавливающего устройства: 1 – пистолет для герметика, 2 – стальная крепежная лента, 3 – шуруп-кольцо, 4 – ПВХ-труба с крышкой, 5а – часть микрокосма без почвы, 5б – часть микрокосма с почвой, 6 – пластиковый диск, разделяющий микрокосм.

Fig. 5. An extrusion device scheme: 1 – Caulking Gun, 2 – steel strap, 3 – steel screw eye rings, 4 – PVC pipe with cap, 5a – part of the microcosm without soil, 5b – part of the soil microcosm with soil, 6 – plastic disc dividing the microcosm.

Пистолет при работе держали вертикально, выдавливали почву настолько, чтобы слой толщиной 3–5 мм можно было удалить. Во время работы следили, чтобы образец выдавливался равномерно по всей площади образца. Выдавливали образец медленно, не сжимая микрокосм сильно в руках, так как при сдавливании сосуда нарушается сложение почвы и появляются трещины. Срезав выдавленный слой, фиксировали глубину расположения рабочей поверхности почвы с помощью линейки. Почву срезали так, чтобы уровень поверхности почвы был ровень с краем стакана. Перед внесением субстратных растворов при искусственном освещении делали фото поверхности почвы в микрокосме.

Подготовленную поверхность почвы опрыскивали облаком дистиллированной воды из пульверизатора для обеспечения рав-

номерного контакта с мембранным фильтром, содержащим субстрат. Опрыскивание проводили с расстояния 0.5 м, держа микрокосмы в вертикальном положении. На поверхность почвы клали мембрану, использовали нейлоновые фильтры с порами размером 0.22 мкм. Для предотвращения высыхания мембранного фильтра, пропитанного раствором, его накрывали материалом, не задерживающим и не отражающим УФ-лучи, в качестве которого использовали обычные канцелярские файлы для бумаг. Дальнейшее фотографирование и инкубирование образцов проводили также с файлами. Непосредственно после внесения субстрата проводили фотосъемку. Это фото считали 0-моментом, именно эта точка является началом периода инкубации и контролем. Контроль нужен для того, чтобы выявить активность за указанный промежуток времени. Повторное фото делали спустя 1, 2, 4, 8 и 24 часа, и получали собственно зимограмму (рис. 9). Важно, чтобы положение фильтра на всех фото было одинаково ориентировано в пространстве. Для этого на рабочий стол и на стакан с микрокосмом наносили метку белым маркером, а при фотографировании эти метки совмещали. Для этого удобно использовать маркер белого цвета, так как его хорошо видно в темноте. Все работы с микрокосмами проводили строго в перчатках, для переключивания фильтров использовали пинцеты. При фотографировании в УФ-свете использовали защитные очки Uvex Ай-воркс (UV 400).

Обеспечение контакта на границе почва – мембранный фильтр

Контакт между субстратом и почвой – один из ключевых факторов, определяющих качество результатов зимографии. Рисунок на зимограмме подразумевает, что в области, где выделилось много флуоресцирующих молекул, активность высокая, в точках, где таких молекул мало или нет, соответственно, активность низкая или ее нет. Однако, в случае, когда обеспечен недостаточный контакт между почвой и раствором субстрата, реакция не происходит, и мы получим картину, не отражающую реальную ферментативную активность в почве ([Guber et al., 2018](#)). Чем более неровная и шероховатая поверхность почвы, тем меньше контакта между почвой и субстратом. Некоторые исследователи ([Razavi et](#)

[al., 2019](#)) указывают на необходимость проведения лазерного сканирования поверхности почвы перед проведением зимографии.

Мы срезали поверхность почвы максимально ровно, не замазывая при этом слой – важно естественное сложение поверхности. Также мы, во-первых, немного увлажняли образец из пульверизатора непосредственно перед зимографией, чтобы можно было “приклеить” мембранный фильтр к поверхности почвы. Во-вторых, с помощью пинцета или руками в перчатках прижимали фильтр к почве без оказания сильного давления, чтобы не нарушить естественного сложения почвы. В-третьих, после внесения субстрата и фото 0-момента на поверхность ставили стеклянную чашку Петри, на которую помещали дополнительный груз. Razavi et al. (2019) утверждают, что разный вес может оказывать разное влияние на результаты, поэтому мы везде использовали одинаковую массу груза. Во избежание получения некорректных результатов, важно распределять вес равномерно по всей поверхности образца. Это доказывает тот факт, что, когда мы поставили колбу непосредственно на поверхность мембраны, без использования чашки Петри, имеющей ровное дно, мы получили рисунок, отражающий активность в тех точках, где несколько более выпуклые краевые участки дна колбы соприкасались с поверхностью почвы в большей степени (рис. 6).

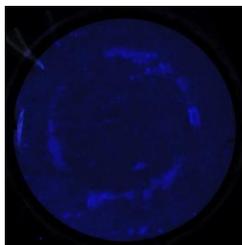


Рис. 6. Зимограмма почвы при неравномерном контакте мембранного фильтра с поверхностью микрокосма.

Fig. 6. Soil zymogram after non-equilibrium contact between membrane filter and soil surface.

Особенности внесения раствора субстрата

Для корректной обработки данных и получения репрезента-

тивных результатов важно знать количество вещества, внесенного на фильтр. Протоколы по зимографии расписаны довольно подробно ([Razavi et al., 2019](#)), однако в них не уделено внимание процедуре внесения субстратов. Мы протестировали три способа внесения субстрата.

Раскапывание. Первоначально мы вносили субстрат согласно схеме (рис. 7А), которая обеспечивает промачивание фильтра по всей его площади. Для мембранных фильтров из нейлона диаметром 70 мм и размером пор 0.22 мкм использовали 270 мкл 10 мМ раствора субстрата, который вносили 30 каплями по 9 мкл с помощью высокоточного микродозатора Sarorius Pícus (т. е. расход субстрата составлял 0.087 мкл на 1 мм²). Однако при анализе почв легкого гранулометрического состава (легкий суглинок) на итоговом фото отобразилась сетка раскапывания (рис. 7Б). При анализе почв тяжелого гранулометрического состава этого явления мы не наблюдали. Легкие по гранулометрическому составу почвы характеризуются хорошей водопроницаемостью, и растворы субстратов, видимо, тяготеют к вертикальной фильтрации, обеспечивая быстрый поток влаги за счет силы тяжести, не позволяя субстрату должным образом промочить весь фильтр. Для того, чтобы избежать появления сетки раскапывания на итоговом фото мы протестировали дополнительно два способа внесения субстрата. Анализ проводили на насыпных образцах почв.

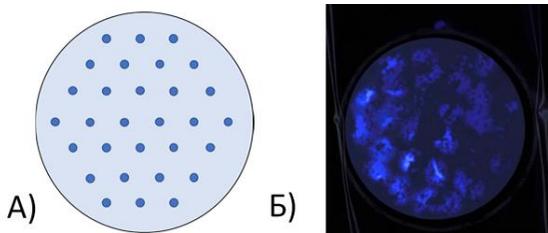


Рис. 7. А) Схема раскапывания раствора субстрата; Б) Зимограмма после 4-х часов инкубирования.

Fig. 7. А) The substrate pipetting scheme; Б) Zymogram after 4 hours of incubation.

Окунание. Каждый фильтр смачивали в растворе непосредственно перед анализом. Для этого раствор наливали в чашку Петри соответствующую диаметру фильтра и ставили ее на аналитические весы. Количество вещества, поглощенного фильтром, определялось по разнице в весе раствора до и после погружения в него фильтра (в среднем расход субстрата на 1 мм² фильтра составлял 0.078 мкл). Несомненное преимущество этого способа внесения в том, что можно точно рассчитать количество внесенного вещества. Недостатками являются трудоемкость; необходимость в дополнительном оборудовании; быстрое высыхание субстрата и, соответственно, постоянный контроль веса; стекание части субстрата к нижнему краю, при доставании его из чашки, что обеспечивает неравномерное распределение раствора субстрата по фильтру.

Насыщение. Фильтры складывали стопкой (в нашем случае, мы одновременно насыщали 32 фильтра) в чашку Петри подходящего диаметра, содержащую раствор в количестве, незначительно большем, чем объем, необходимый для пропитывания фильтров. Нами было рассчитано при раскапывании, что для используемых нами фильтров необходимо вносить раствор в количестве 0.087 мкл/мм². Фильтры насыщали в течение одного часа. Похожий способ использовали Guber et al. (2019) при построении калибровочной кривой. Такой промежуток времени был выбран, т. к. именно столько времени уходит на внесение субстратов раскапыванием на партию из 32 образцов диаметром 70 мм. Через 30 минут стопку переворачивали для более равномерного промачивания. Несомненное достоинство этого метода в том, что он легок в использовании, не требует дополнительных затрат времени и оборудования. Оставшееся количество субстрата контролировали с помощью аналитических весов, для этого взвешивали массу раствора до и после насыщения фильтров, получившуюся разницу делили на количество фильтров, допуская равномерность смачивания всех используемых мембран. Расход субстрата при таком внесении выше, чем в случае с раскапыванием, так как при заливке использовали субстрата с избытком для полного смачивания, а раствор, оставшийся после насыщения, повторно не использовали.

В способах “Окунание” и “Насыщение” на итоговой зимо-

грамме не наблюдали дефектов распределения субстратного раствора на фильтре, как в способе “Раскапывание” в легких (рис. 7А), и тяжелых (рис. 7Б) по гранулометрическому составу почвах. Таким образом, наилучшим мы выбрали способ “Насыщение”, т. к. он обеспечивает равномерное смачивание мембран, возможность точно рассчитать количество внесенного вещества, а также наиболее прост в работе.

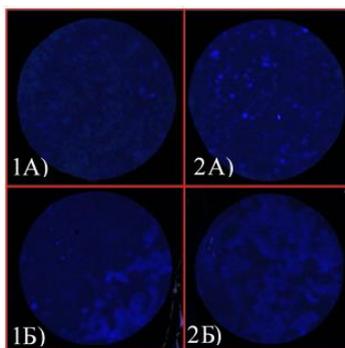


Рис. 8. Зимограмма в песчаных (А) и суглинистых (Б) почвах в зависимости от способа внесения субстрата: 1 – окунание, 2 – насыщение.

Fig. 8. Zymogram of the sandy (А) and loam (Б) soils. 1 – dipping, 2 – saturation.

Оптимальное время инкубирования образцов

Критериями для выбора оптимального времени инкубации образца являются стабильная интенсивность свечения без горизонтальной диффузии на мембране, не увеличивающаяся со временем ([Razavi et al., 2019](#)). Для выявления оптимального периода инкубации провели ряд анализов. Для этого делали фото образцов через 1, 2, 4, 8 и 24 часа.

Несмотря на то, что мы использовали метод прямой зимографии ([Razavi et al., 2016](#); [Hoang et al., 2016](#)), когда насыщенная субстратом мембрана кладется непосредственно на поверхность почвы, 1 часа инкубации ([Schofield et al., 2019](#)) явно было недостаточно для достижения максимальной интенсивности. Мы установили, что для образцов тяжелого гранулометрического состава

необходимо от 4 до 6 часов инкубации для достижения равновесного состояния и стабильного свечения (рис. 9). Через 1 и 2 часа инкубирования мы не наблюдали стабильного свечения ни в одном из рассмотренных вариантов. На 8-часовых пробах видно, что начались процессы горизонтальной диффузии, из-за чего мы наблюдаем размытие картины, что на суточной пробе видно особенно хорошо.

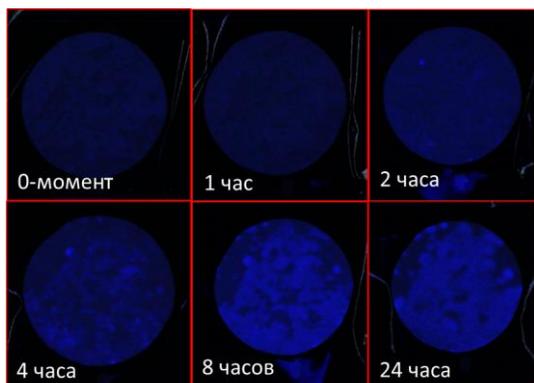


Рис. 9. Зимограммы суглинистой почвы в зависимости от длительности периода инкубации.

Fig. 9. Clay loam soils zymogram after different incubation time.

В почвах легкого гранулометрического состава стабилизация происходит быстрее. Оптимальным периодом инкубации здесь являются 2–3 часа (рис. 9). На 4-часовой пробе видно, что горизонтальная диффузия уже началась и только усиливается далее.

Разница обусловлена тем, что тяжелые почвы содержат преимущественно внутриклеточные ферменты, адсорбированные в мелких частичках и для протекания реакции и разрыва связи 1 часа недостаточно. В легких по гранулометрическому составу почвах ферменты преимущественно находятся в почвенном растворе и способны к быстрой реакции. Стоит отметить, что ФА почв разных типов также отличается.

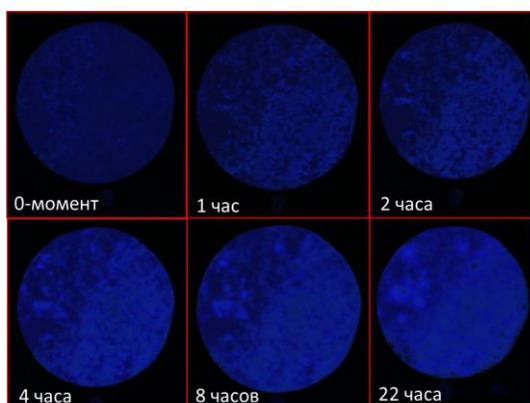


Рис. 10. Зимограммы песчаной почвы в зависимости от длительности периода инкубации.

Fig. 10. Sandy soils zymogram after different incubation time.

Таким образом, для изученных суглинистых почв оптимальным временем инкубирования был выбран интервал 2–4 часа, а для песчаных почв – 1–2 часа. Стоит отметить, что данный интервал не является универсальным, в разных по свойствам почвах биохимические процессы могут протекать с разной скоростью.

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА

Почвенная зимография – перспективный метод для определения пространственного распределения ферментативной активности почв. Однако особенно перспективной является возможность сопоставить данные зимографии с другими методами, дающими пространственную характеристику свойств, например, совмещение с данными компьютерной томографии ([Guber et al., 2019](#); [Razavi et al., 2016](#)) и радиоизотопными анализами ([Kravchenko et al., 2021](#)). Использование нейросетевых технологий позволяет на основе томографических срезов и зимографических изображений с высокой достоверностью получить объемную модель ферментативной активности в почве ([Нарца et al., 2015](#)). Совместно с другими методами зимография может помочь визуализировать и выявить “hotspots” – так называемые “горячие точки”, где почвенная

активность является наиболее высокой ([Kuzyakov, Blagodatskaya, 2015](#); [Bilyera et al., 2020](#)). Данный показатель можно использовать в качестве индикатора состояния почв.

Использование зимографии может значительно расширить наши представления о функциях почвенной микробиоты, являющейся основным продуцентом ферментов. Биохимические циклы элементов контролируются микробиотой, поэтому изучение их сквозь призму активности микроорганизмов позволит установить механизмы трансформации органических веществ и стабилизации углерода почвами. Также зимография позволяет количественно оценить пространственную изменчивость ФА вокруг корней ([Khosrozadeh et al., 2022](#)), возникающую из-за сложной структуры и разнообразия микробных сообществ ризосферы ([Pinton et al., 2001](#)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зимография – новый метод, позволяющий визуализировать активность почвенных ферментов. Мы подробно показали, как может быть реализована зимографическая установка для исследования образцов почв различного формата и размера в лабораторных условиях, а также уделили внимание методическим тонкостям, реализация которых необходима для получения репрезентативных результатов анализа.

Зимография как метод, основанный на использовании микроколичеств активных веществ и дающий пространственную визуализацию активности ферментов на масштабе мкм-мм, требует качественно проделанной подготовительной работы и предельной аккуратности при проведении самого анализа. Важно заранее проанализировать и подобрать подходящие концентрации фермент-специфичного субстратного раствора, внимание этому уделяли еще [Razavi et al. \(2019\)](#). На основе экспериментальных данных и моделирования было показано, что выявляемая зимографией ФА составляет до 30% от потенциальных реакций, протекающих в общем объеме почвы ([Ma et al., 2017](#); [Guber et al., 2018](#)). Однако непонятно, насколько можно предсказать результаты зимографии, ориентируясь на величины классической ФА и на основе этих данных готовить, например, субстратные растворы необходимой

концентрации. Остается открытым вопрос и об оптимальном времени инкубации. На данном этапе пока еще нет возможности установить универсальное время инкубирования образцов, для каждого типа (возможно, и подтипа) почв оно является своим и зависит от ряда характеристик: скорости протекания биохимических процессов в почвах, гранулометрического состава, условий проведения зимографии (температура инкубирования образцов во время проведения зимографии). Поэтому при презентации результатов метода необходимо детально документировать условия проведения эксперимента и параметры использованных реактивов, расходных материалов и образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даденко Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Изменение ферментативной активности при хранении почвенных образцов // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1481–1486.
2. Девятова Т.А. Ферментативная активность чернозема выщелоченного при длительном систематическом применении удобрений // Агрохимия. 2006. № 1. С. 12–15.
3. Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М. Сезонная оксиредуктазная активность осушенных торфяных почв в связи с гидротермическими условиями среды // Сибирский экологический журнал. 2008. Т. 15. № 3. С. 441–449.
4. Инишева Л.И., Ивлева С.Н., Щербакова Т.А. Руководство по определению ферментативной активности торфяных почв и торфов. Т.: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2003. 119 с.
5. Каширская Н.Н., Плеханова Л.Н., Чернышева Е.В., Ельцов М.В., Удальцов С.Н., Борисов А.В. Пространственно-временные особенности фосфатазной активности естественных и антропогенно-преобразованных почв // Почвоведение. 2020. № 1. С. 89–101. DOI: [10.1134/S0032180X20010098](https://doi.org/10.1134/S0032180X20010098).
6. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 1990. 192 с.
7. Alkorta I., Aizpurua A., Riga P., Albizu I., Amézaga I., Garbisu C. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health // Rev. Environ. Health. 2003. Vol. 18. No. 1. P. 65–73. DOI: [10.1515/REVEH.2003.18.1.65](https://doi.org/10.1515/REVEH.2003.18.1.65).
8. Baldrian P., Větrovský T. Scaling down the analysis of environmental processes: Monitoring enzyme activity in natural substrates on a millimeter

resolution scale // *Appl. Environ. Microbiol.* 2012. Vol. 78. No. 9. P. 3473–3475. DOI: [10.1128/AEM.07953-11](https://doi.org/10.1128/AEM.07953-11).

9. *Bilyera N., Kuzyakova I., Guber A., Razavi B.S., Kuzyakov Y.* How “hot” are hotspots: Statistically localizing the high-activity areas on soil and rhizosphere images // *Rhizosphere*. 2020. Vol. 16. P. 100259. DOI: [10.1016/j.rhisph.2020.100259](https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100259).

10. *Bilyera N., Zhang X., Duddek P., Fan L., Banfield C.C., Schlüter S., Carminati A., Kaestner A., Ahmed M.A., Kuzyakov Y., Dippold M.A., Spielvogel S., Razavi B.S.* Maize genotype-specific exudation strategies: an adaptive mechanism to increase microbial activity in the rhizosphere // *Soil Biol. Biochem.* 2021. Vol. 162. P. 108426. DOI: [10.1016/j.soilbio.2021.108426](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108426).

11. *Burns R.G.* Soil enzymology // *Sci. Prog.* 1977. Vol. 64. No. 254. P. 275–285. URL: <https://www.jstor.org/stable/43420415>.

12. *Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A.* Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // *Soil Biol. Biochem.* 2013. Vol. 58. P. 216–234. DOI: [10.1016/j.soilbio.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009).

13. *Cao T., Kong X., He W., Chen Y., Fang Y., Li Q., Chen Q., Luo Y., Tian X.* Spatiotemporal characteristics of enzymatic hotspots in subtropical forests: In situ evidence from 2D zymography images // *Catena*. 2022. Vol. 216. P. 106365. DOI: [10.1016/j.catena.2022.106365](https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106365).

14. *Dong S., Brooks D., Jones M.D., Grayston S.J.* A method for linking in situ activities of hydrolytic enzymes to associated organisms in forest soils // *Soil Biol. Biochem.* 2007. Vol. 39. No. 9. P. 2414–2419. DOI: [10.1016/j.soilbio.2007.03.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.030).

15. *Duan C., Fang L., Yang C., Chen W., Cui Y., Li S.* Reveal the response of enzyme activities to heavy metals through in situ zymography // *Ecotoxicol. Environ. Saf. Safety*. 2018. Vol. 156. P. 106–115. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.015).

16. *Ge T., Wei X., Razavi B.S., Zhu Z., Hu Y., Kuzyakov Y., Jones D.L., Wu J.* Stability and dynamics of enzyme activity patterns in the rice rhizosphere: effects of plant growth and temperature // *Soil Biol. Biochem.* 2017. Vol. 113. P. 108–115. DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.06.005](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.005).

17. *Gianfreda L., Bollag J.M.* Effect of soils on the behavior of immobilized enzymes // *SSSA Journal*. 1994. Vol. 58. No. 6. P. 1672–1681. DOI: [10.2136/sssaj1994.03615995005800060014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060014x).

18. *Giles C.D., Dupuy L., Boitt G., Brown L.K., Condrón L.M., Darch T., Blackwell M.S.A., Menezes-Blackburn D., Shand C.A., Stutter M.I., Lumsdon D.G., Wendler R., Cooper P., Wearing C., Zhang H., Haygarth P.M., Georgea T.S.* Root development impacts on the distribution of

phosphatase activity: improvements in quantification using soil zymography // *Soil Biol. Biochem.* 2018. Vol. 116. P. 158–166. DOI:

[10.1016/j.soilbio.2017.08.011](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.011).

19. *Gramms G., Voigt K.D., Kirsche B.* Oxidoreductase enzymes liberated by plant roots and their effects on soil humic material // *Chemosphere.* 1999. Vol. 38. P. 1481–1494. DOI: [10.1016/S0045-6535\(98\)00369-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00369-5).

20. *Guber A., Kravchenko A., Razavi B.S., Uteau D., Peth S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Quantitative soil zymography: mechanisms, processes of substrate and enzyme diffusion in porous media // *Soil Biol. Biochem.* 2018. Vol. 127. P. 156–167. DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.09.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.030).

21. *Guber A., Kravchenko A., Razavi B.S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Calibration of 2-D soil zymography for correct analysis of enzyme distribution // *Eur. J. Soil Sci.* 2019. Vol. 70. No. 4. P. 715–726. DOI: [10.1111/ejss.12744](https://doi.org/10.1111/ejss.12744).

22. *Guber A., Blagodatskaya E., Juyal A., Razavi B.S., Kuzyakov Y., Kravchenko A.* Time-lapse approach to correct deficiencies of 2D soil zymography // *Soil Biol. Biochem.* 2021. Vol. 157. P. 108225. DOI: [10.1016/j.soilbio.2021.108225](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108225).

23. *Hapca S., Baveye P. C., Wilson C., Lark R. M., Otten W.* Three-dimensional mapping of soil chemical characteristics at micrometric scale by combining 2D SEM-EDX data and 3D X-Ray CT images // *Plos one.* 2015. Vol. 10. No. 9. P. e0137205. DOI: [10.1371/journal.pone.0137205](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137205).

24. *Heitkötter J., Marschner B.* Soil zymography as a powerful tool for exploring hotspots and substrate limitation in undisturbed subsoil. *Soil Biol. Biochem.* 2018. Vol. 124. P. 210–217. DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.06.021](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.021).

25. *Hoang D.T.T., Razavi B.S., Kuzyakov Y., Blagodatskaya E.* Earthworm burrows: kinetics and spatial distribution of enzymes of C-, N-and P-cycles // *Soil Biol. Biochem.* 2016. Vol. 99. P. 94–103. DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.04.021](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.021).

26. *Khosrozadeh S., Guber A., Kravchenko A., Ghaderi N., Blagodatskaya E.* Soil oxidoreductase zymography: Visualizing spatial distributions of peroxidase and phenol oxidase activities at the root-soil interface // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 167. P. 108610. DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108610](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108610).

27. *Kravchenko A., Guber A., Razavi B.S., Koestel J., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Spatial patterns of extracellular enzymes: combining X-ray computed micro-tomography and 2D zymography // *Soil Biol. Biochem.* 2019a. Vol. 135. P. 411–419. DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.06.002](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.06.002).

28. *Kravchenko A.N., Guber A.K., Razavi B.S., Koestel J., Quigley M.Y., Robertson G.P., Kuzyakov Y.* Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization // *Nat. Commun.* 2019b. Vol. 10. No. 1. P. 1–10. DOI: [10.1038/s41467-019-11057-4](https://doi.org/10.1038/s41467-019-11057-4).

29. *Kravchenko A., Guber A., Gunina A., Dippold M., Kuzyakov Y.* Pore-scale view of microbial turnover: Combining ¹⁴C imaging, μ CT and zymography after adding soluble carbon to soil pores of specific sizes // *Eur. J. Soil Sci.* 2021. Vol. 72. No. 2. P. 593–607. DOI: [10.1111/ejss.13001](https://doi.org/10.1111/ejss.13001).
30. *Kuzyakov Y., Blagodatskaya E.* Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept and review // *Soil Biol. Biochem.* 2015. Vol. 83. P. 184–199. DOI: [10.1016/j.soilbio.2015.01.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025).
31. *Ma X., Razavi B.S., Holz M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Warming increases hotspot areas of enzyme activity and shortens the duration of hot moments in the root-detritosphere // *Soil Biol. Biochem.* 2017. Vol. 107. P. 226–233. DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.01.009](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.01.009).
32. *Pinton R., Varanini Z., Nannipieri P.* The rhizosphere as a site of biochemical interactions among soil components, plants, and microorganisms // *The rhizosphere*. CRC Press, 2000. P. 17–34.
33. *Rao M.A., Violante A., Gianfreda L.* Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organo-mineral complexes: kinetics and stability // *Soil Biol. Biochem.* 2000. Vol. 32. P. 1007–1014.
34. *Razavi B.S., Zarebanadkouki M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Rhizosphere shape of lentil and maize: spatial distribution of enzyme activities // *Soil Biol. Biochem.* 2016. Vol. 96. P. 229–237. DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.02.020](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.020).
35. *Razavi B.S., Zhang X., Bilyera N., Guber A., Zarebanadkouki M.* Soil zymography: simple and reliable? Review of current knowledge and optimization of the method // *Rhizosphere*. 2019. Vol. 11. P. 100161. DOI: [10.1016/j.rhisph.2019.100161](https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2019.100161).
36. *Razavi B.S., Hoang D., Kuzyakov Y.* Visualization of enzyme activities in earthworm biopores by in situ soil zymography // *Methods in Molecular Biology. Zymography*. N.Y.: Humana Press, 2017. P. 229–238. DOI: [10.1007/978-1-4939-7111-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7111-4).
37. *Sanaullah M., Razavi B.S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Spatial distribution and catalytic mechanisms of β -glucosidase activity at the root-soil interface // *Biol. Fertil. Soils*. 2016. Vol. 52. P. 505–514. DOI: [10.1007/s00374-016-1094-8](https://doi.org/10.1007/s00374-016-1094-8).
38. *Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J.-Y., White D.J., Hartenstein V., Eliceiri K., Tomancak P., Cardola A.* Fiji: an open-source platform for biological-image analysis // *Nature methods*. 2012. Vol. 9. No. 7. P. 676–682. DOI: [10.1038/nmeth.2019](https://doi.org/10.1038/nmeth.2019).
39. *Schofield E.J., Brooker R.W., Rowntree J.K., Price E.A.C., Brearley F.Q., Paterson E.* Plant-plant competition influences temporal dynamism of soil

- microbial enzyme activity // *Soil Biol. Biochem.* 2019. Vol. 139. P. 107615. DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.107615](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107615).
40. *Spohn M., Kuzyakov Y.* Distribution of microbial-and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation – Coupling soil zymography with 14C imaging // *Soil Biol. Biochem.* 2013. Vol. 67. P. 106–113. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.08.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.015).
41. *Spohn M., Carminati A., Kuzyakov Y.* Soil zymography – a novel in situ method for mapping distribution of enzyme activity in soil // *Soil Biol. Biochem.* 2013. Vol. 58. P. 275–280. DOI: [10.1016/j.soilbio.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.12.004).
42. *Spohn M., Kuzyakov Y.* Spatial and temporal dynamics of hotspots of enzyme activity as affected by living and dead roots – a soil zymography analysis// *Plant Soil.* 2014. Vol. 379. P. 67–77. DOI: [10.1007/s11104-014-2041-9](https://doi.org/10.1007/s11104-014-2041-9).
43. *Steinweg J.M., Dukes J.S., Paul E.A., Wallenstein M.D.* Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes // *Front. Microbiol.* 2013. Vol. 4. P. 146. DOI: [10.3389/fmicb.2013.00146](https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00146).
44. *Tabatabai M.A., Dick W.A.* Enzymes in soil: research and developments in measuring activities // *Enzymes in the environment: Activity, ecology, and applications.* N.Y.: Marcel Dekker, 2002. P. 567–596.
45. *Wallenstein M.D., Weintraub M.N.* Emerging tools for measuring and modeling the in-situ activity of soil extracellular enzymes // *Soil Biol. Biochem.* 2008. Vol. 40. No. 9. P. 2098–2106. DOI: [10.1016/j.soilbio.2008.01.024](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.024).

REFERENCES

1. Dadenko E.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., *Izmenenie fermentativnoi aktivnosti pri khraneniі pochvennykh obratstov* (Changes in the enzymatic activity of soil samples upon their storage), *Pochvovedenie*, 2009, No. 12, pp. 1481–1486.
2. Devyatova T.A., *Fermentativnaya aktivnost' chernozema vyshchelochennogo pri dlitel'nom sistematicheskom primeneniі udobrenii* (Enzymatic activity of leached chernozem upon long-term application of fertilizers), *Agrokhimiya*, 2006, No. 1, pp. 12–15.
3. Efremova T.T., Ovchinnikova T.M., *Sezonnaya oksireduktaznaya aktivnost' osushennykh torfyanykh pochv v svyazi s gidrotermicheskimi usloviyami sredy* (Seasonal oxidoreductase activity of reclaimed peat soil in connection with the hydrothermal environmental conditions), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2008, Vol. 15, No. 3, pp. 441–449.
4. Inisheva L.I., Ivleva S.N., Shcherbakova T.A., *Rukovodstvo po opredeleniyu fermentativnoi aktivnosti torfyanykh pochv i torfov* (Handbook

for enzymatic activity determination of peat soils and peats), Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii gosudarstvennyi universitet, 2003, 119 p.

5. Kashirskaya N.N., Plekhanova L N., Chernysheva E.V., El'tsov M.V., Udaltsov S.N., Borisov A.V., Prostranstvenno-vremennye osobennosti fosfataznoi aktivnosti estestvennykh i antropogenno-preobrazovannykh pochv (Temporal and spatial features of phosphatase activity in natural and human-transformed soils), *Pochvovedenie*, 2020, No. 1, pp. 89–101.

6. Khaziev F.Kh., *Metody pochvennoi enzimologii* (Methods of soil enzymology), Moscow: Nauka, 1990, 192 p.

7. Alkorta I., Aizpurua A., Riga P., Albiza I., Amézaga I., Garbisu C., Soil enzyme activities as biological indicators of soil health, *Reviews on Environmental Health*, 2003, Vol. 18, No. 1, pp. 65–73, DOI: [10.1515/REVEH.2003.18.1.65](https://doi.org/10.1515/REVEH.2003.18.1.65).

8. Baldrian P., Větrovský T., Scaling down the analysis of environmental processes: Monitoring enzyme activity in natural substrates on a millimeter resolution scale, *Appl. Environ. Microbiol.*, 2012, Vol. 78, No. 9, pp. 3473–3475, DOI: [10.1128/AEM.07953-11](https://doi.org/10.1128/AEM.07953-11).

9. Bilyera N., Kuzyakova I., Guber A., Razavi B.S., Kuzyakov Y., How “hot” are hotspots: Statistically localizing the high-activity areas on soil and rhizosphere images, *Rhizosphere*, 2020, Vol. 16, p. 100259, DOI: [10.1016/j.rhisph.2020.100259](https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100259).

10. Bilyera N., Zhang X., Duddek P., Fan L., Banfield C.C., Schlüter S., Carminati A., Kaestner A., Ahmed M.A., Kuzyakov Y., Dippold M.A., Spielvogel S., Razavi B.S., Maize genotype-specific exudation strategies: an adaptive mechanism to increase microbial activity in the rhizosphere, *Soil Biol. Biochem.*, 2021, Vol. 162, p. 108426, DOI: [10.1016/j.soilbio.2021.108426](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108426).

11. Burns R.G., Soil enzymology, *Sci. Prog.*, 1977, Vol. 64, No. 254, pp. 275–285, URL: <https://www.jstor.org/stable/43420415>.

12. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A., Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions, *Soil Biol. Biochem.*, 2013, Vol. 58, pp. 216–234, DOI: [10.1016/j.soilbio.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009).

13. Cao T., Kong X., He W., Chen Y., Fang Y., Li Q., Chen Q., Luo Y., Tian X., Spatiotemporal characteristics of enzymatic hotspots in subtropical forests: In situ evidence from 2D zymography images, *Catena*, 2022, Vol. 216, p. 106365, DOI: [10.1016/j.catena.2022.106365](https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106365).

14. Dong S., Brooks D., Jones M.D., Grayston S.J., A method for linking in situ activities of hydrolytic enzymes to associated organisms in forest soils,

- Soil Biol. Biochem.*, 2007, Vol. 39, No. 9, pp. 2414–2419, DOI: [10.1016/j.soilbio.2007.03.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.030).
15. Duan C., Fang L., Yang C., Chen W., Cui Y., Li S., Reveal the response of enzyme activities to heavy metals through in situ zymography, *Ecotoxicol. Environ. Safety.*, 2018, Vol. 156, pp. 106–115, DOI: [10.1016/j.ecoenv.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.015).
16. Ge T., Wei X., Razavi B.S., Zhu Z., Hu Y., Kuzyakov Y., Jones D.L., Wu J., Stability and dynamics of enzyme activity patterns in the rice rhizosphere: effects of plant growth and temperature, *Soil Biol. Biochem.*, 2017, Vol. 113, pp. 108–115, DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.06.005](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.005).
17. Gianfreda L., Bollag J.M., Effect of soils on the behavior of immobilized enzymes, *SSSA Journal*, 1994, Vol. 58, No. 6, pp. 1672–1681, DOI: [10.2136/sssaj1994.03615995005800060014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060014x).
18. Giles C.D., Dupuy L., Boitt G., Brown L.K., Condron L.M., Darch T., Blackwell M.S.A., Menezes-Blackburn D., Shand C.A., Stutter M.I., Lumsdon D.G., Wendler R., Cooper P., Wearing C., Zhang H., Haygarth P.M., Georgea T.S., Root development impacts on the distribution of phosphatase activity: improvements in quantification using soil zymography, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 116, pp. 158–166, DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.08.011](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.011).
19. Gramms G., Voigt K.D., Kirsche B., Oxidoreductase enzymes liberated by plant roots and their effects on soil humic material, *Chemosphere*, 1999, Vol. 38, pp. 1481–1494, DOI: [10.1016/S0045-6535\(98\)00369-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00369-5).
20. Guber A., Kravchenko A., Razavi B.S., Uteau D., Peth S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Quantitative soil zymography: mechanisms, processes of substrate and enzyme diffusion in porous media, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 127, pp. 156–167, DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.09.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.030).
21. Guber A.K., Kravchenko A.N., Razavi B.S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Calibration of 2-D soil zymography for correct analysis of enzyme distribution, *Eur. J. Soil Sci.*, 2019, Vol. 70, No. 4, p. 715–726, DOI: [10.1111/ejss.12744](https://doi.org/10.1111/ejss.12744).
22. Guber A., Blagodatskaya E., Juyal A., Razavi B.S., Kuzyakov Y., Kravchenko A., Time-lapse approach to correct deficiencies of 2D soil zymography, *Soil Biol. Biochem.*, 2021, Vol. 157, p. 108225, DOI: [10.1016/j.soilbio.2021.108225](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108225).
23. Hapca S., Baveye P. C., Wilson C., Lark R. M., Otten W., Three-dimensional mapping of soil chemical characteristics at micrometric scale by combining 2D SEM-EDX data and 3D X-Ray CT images, *Plos one*, 2015, Vol. 10, No. 9, p. e0137205, DOI: [10.1371/journal.pone.0137205](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137205).
24. Heitkötter J., Marschner B., Soil zymography as a powerful tool for exploring hotspots and substrate limitation in undisturbed subsoil, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 124, p. 210–217, DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.06.021](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.021).

25. Hoang D.T.T., Razavi B.S., Kuzyakov Y., Blagodatskaya E., Earthworm burrows: kinetics and spatial distribution of enzymes of C-, N-and P-cycles, *Soil Biol. Biochem.*, 2016, Vol. 99, pp. 94–103, DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.04.021](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.021).
26. Khosrozadeh S., Guber A., Kravchenko A., Ghaderi N., Blagodatskaya E., Soil oxidoreductase zymography: Visualizing spatial distributions of peroxidase and phenol oxidase activities at the root-soil interface, *Soil Biol. Biochem.*, 2022, Vol. 167, p. 108610, DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108610](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108610).
27. Kravchenko A., Guber A., Razavi B.S., Koestel J., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Spatial patterns of extracellular enzymes: combining X-ray computed micro-tomography and 2D zymography, *Soil Biol. Biochem.* 2019a, Vol. 135, pp. 411–419, DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.06.002](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.06.002).
28. Kravchenko A.N., Guber A.K., Razavi B.S., Koestel J., Quigley M.Y., Robertson G.P., Kuzyakov Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization, *Nat. Commun.*, 2019b, Vol. 10, No. 1, pp. 1–10, DOI: [10.1038/s41467-019-11057-4](https://doi.org/10.1038/s41467-019-11057-4).
29. Kravchenko A., Guber A., Gunina A., Dippold M., Kuzyakov Y., Pore-scale view of microbial turnover: Combining ¹⁴C imaging, μ CT and zymography after adding soluble carbon to soil pores of specific sizes, *Eur. J. Soil Sci.*, 2021, Vol. 72, No. 2, pp. 593–607, DOI: [10.1111/ejss.13001](https://doi.org/10.1111/ejss.13001).
30. Kuzyakov Y., Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept and review, *Soil Biol. Biochem.*, 2015, Vol. 83, pp. 184–199, DOI: [10.1016/j.soilbio.2015.01.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025).
31. Ma X., Razavi B.S., Holz M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Warming increases hotspot areas of enzyme activity and shortens the duration of hot moments in the root-detritusphere, *Soil Biol. Biochem.*, 2017, Vol. 107, pp. 226–233, DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.01.009](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.01.009).
32. Pinton R., Varanini Z., Nannipieri P., The rhizosphere as a site of biochemical interactions among soil components, plants, and microorganisms, *The rhizosphere*, CRC Press, 2000, pp. 17–34.
33. Rao M.A., Violante A., Gianfreda L., Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organo-mineral complexes: kinetics and stability, *Soil Biol. Biochem.*, 2000, Vol. 32, pp. 1007–1014, DOI: [10.1016/S0038-0717\(00\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00010-9).
34. Razavi B.S., Zarebanadkouki M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Rhizosphere shape of lentil and maize: spatial distribution of enzyme activities, *Soil Biol. Biochem.*, 2016, Vol. 96., pp. 229–237, DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.02.020](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.020).
35. Razavi B.S., Zhang X., Bilyera N., Guber A., Zarebanadkouki M., Soil zymography: simple and reliable? Review of current knowledge and

- optimization of the method, *Rhizosphere*, 2019, Vol. 11, p. 100161, DOI: [10.1016/j.rhisph.2019.100161](https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2019.100161).
36. Razavi B.S., Hoang D., Kuzyakov Y., Visualization of enzyme activities in earthworm biopores by in situ soil zymography, *Methods in Molecular Biology. Zymography*. New York: Humana Press, 2017, pp. 229–238, DOI: [10.1007/978-1-4939-7111-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7111-4).
37. Sanaullah M., Razavi B.S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Spatial distribution and catalytic mechanisms of β -glucosidase activity at the root-soil interface, *Biol. Fertil. Soils*, 2016, Vol. 52, pp. 505–514, DOI: [10.1007/s00374-016-1094-8](https://doi.org/10.1007/s00374-016-1094-8).
38. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J.-Y., White D.J., Hartenstein V., Eliceiri K., Tomancak P., Cardona A., Fiji: an open-source platform for biological-image analysis, *Nature methods*, 2012, Vol. 9, No. 7, pp. 676–682, DOI: [10.1038/nmeth.2019](https://doi.org/10.1038/nmeth.2019).
39. Schofield E.J., Brooker R.W., Rowntree J.K., Price E.A.C., Brearley F.Q., Paterson E., Plant-plant competition influences temporal dynamism of soil microbial enzyme activity, *Soil Biol. Biochem.*, 2019, Vol. 139, p. 107615, DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.107615](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107615).
40. Spohn M., Kuzyakov Y., Distribution of microbial- and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation – Coupling soil zymography with ^{14}C imaging, *Soil Biol. Biochem.*, 2013, Vol. 67, pp. 106–113, DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.08.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.015).
41. Spohn M., Carminati A., Kuzyakov Y., Soil zymography – a novel in situ method for mapping distribution of enzyme activity in soil, *Soil Biol. Biochem.*, 2013, Vol. 58, pp. 275–280, DOI: [10.1016/j.soilbio.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.12.004).
42. Spohn M., Kuzyakov Y. Spatial and temporal dynamics of hotspots of enzyme activity as affected by living and dead roots – a soil zymography analysis, *Plant Soil*, 2014, Vol. 379, pp. 67–77, DOI: [10.1007/s11104-014-2041-9](https://doi.org/10.1007/s11104-014-2041-9).
43. Steinweg J.M., Dukes J.S., Paul E.A., Wallenstein M.D., Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes, *Front. Microbiol.*, 2013, Vol. 4, 146 p., DOI: [10.3389/fmicb.2013.00146](https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00146).
44. Tabatabai M.A., Dick W.A., Enzymes in soil: research and developments in measuring activities, *Enzymes in the environment: Activity, ecology, and applications*, New York: Marcel Dekker, 2002, pp. 567–596.
45. Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Emerging tools for measuring and modeling the *in situ* activity of soil extracellular enzymes, *Soil Biol. Biochem.* 2008, Vol. 40, No. 9, pp. 2098–2106, DOI: [10.1016/j.soilbio.2008.01.024](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.024).

УДК 631.8

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-90-109



Ссылки для цитирования:

Баматов И.М., Васильева Н.А., Владимиров А.А., Васильев Т.А., Перевертин К.А. Влияние полимерной модификации комплексного удобрения на эффективность использования фосфора и калия озимой пшеницей на южном черноземе // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 90-109. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-90-109

Cite this article as:

Bamatov I.M., Vasilyeva N.A. Vladimirov A.A. Vasiliev T.A., Perevertin K.A., Influence of polymer modification of complex fertilizer on the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat on the southern chernozem, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 113, pp. 90-109, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-90-109

Благодарность:

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ № 22-16-00092.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Science Foundation in the framework of the scientific project No. 22-16-00092.

Влияние полимерной модификации комплексного удобрения на эффективность использования фосфора и калия озимой пшеницей на южном черноземе

© 2022 г. И. М. Баматов¹, Н. А. Васильева¹, А. А. Владимиров¹,
Т. А. Васильев^{1*}, К. А. Перевертин²

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0003-1041-4402>, e-mail: tarasvasiliev44@gmail.com.

²ФБГУН “Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова”,
Россия, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33.

Поступила в редакцию 12.10.2022, после доработки 01.12.2022,
принята к публикации 27.12.2022

Резюме: В современных условиях беспрецедентных вызовов в природопользовании, в том числе технологической деградации систем применения удобрений, альтернативой может стать развитие оригинальных форм удобрений пролонгированного действия. Несмотря на значительный прогресс в адаптации прогрессивных систем агрохимических воздействий, применение традиционных форм минеральных удобрений не позволяет использовать весь потенциал вносимых элементов питания, так как процессы неполной денитрификации, иммобилизация и выщелачивание (вымывание) основных макроэлементов (NPK), наряду с действием уреазы, приводят к непроизводительным потерям питательных веществ в почве. Кроме экономических потерь, включая затраты на транспортировку, хранение и внесение традиционных препаративных форм удобрений, имеют место негативные экологические последствия – эвтрофикация водоемов, эмиссия парниковых газов. Исследования проводились в 2022 г. в производственных условиях в Курском районе Ставропольского края в хозяйстве ООО “СтавАгроКом” на черноземе южном карбонатном. В качестве модификатора минеральных удобрений использовался один из наиболее распространенных синтетических полимеров – поливиниловый спирт (ПВС) Норма расхода полимера составляла – 3, 5 и 7 кг на 1 тонну удобрения. Рост урожая положительно коррелировал с дозой полимера в удобрении. Анализ почвенных свойств проведен методом главных компонент. Полученная кластеризация в координатах первых двух компонент (в сумме объясняют 65% вариабельности данных) показывает значимые различия в свойствах почвы под разными вариантами опыта. Предложен дифференциальный показатель – добавочная эффективность использования питательных элементов (Е). Она оценивалась по прибавке урожая относительно нулевой дозы полимера на единицу снижения концентрации данного элемента в почве согласно предложенной формуле. Показано, что использование полимера в модифицированном удобрении дает статистически значимое увеличение эффективности использования фосфора и калия озимой пшеницей.

Ключевые слова: южные черноземы, минеральные удобрения пролонгированного действия, биополимеры, метод главных компонент.

Influence of polymer modification of complex fertilizer on the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat on the southern chernozem

© 2022 I. M. Bamatov¹, N. A. Vasilyeva¹, A. A. Vladimirov¹,
T. A. Vasiliev^{1*}, K. A. Perevertin²

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-1041-4402>, e-mail: tarasvasiliev44@gmail.com.

²*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution
of the Russian Academy of Sciences,
33, Leninsky Prospekt, Moscow 119071, Russian Federation.
Received 12.10.2022, Revised 01.12.2022, Accepted 27.12.2022*

Abstract: In modern conditions of unprecedented challenges, an alternative to the technological degradation of fertilizer application systems can be the development of original forms of long-acting fertilizers. Despite significant progress in the adaptation of progressive systems of agrochemical impacts, the use of traditional forms of mineral fertilizers does not allow using the full potential of the introduced nutrients, since the processes of incomplete denitrification, immobilization and leaching (leaching) of the main macronutrients (NPK), along with the action of urease, lead to unproductive loss of nutrients in the soil. In addition to economic losses, there are negative environmental consequences – eutrophication of water bodies, emission of greenhouse gases. The studies were carried out in 2022 under production conditions in the Kursk district of the Stavropol Territory on the farm of “StavAgroCom” on southern carbonate chernozem. As a modifier of mineral fertilizers, one of the most common synthetic polymers, polyvinyl alcohol (PVA), was used. The polymer consumption rate was 3, 5 and 7 kg per 1 ton of fertilizer. Yield growth was positively correlated with the dose of polymer in the fertilizer. The analysis of soil properties was carried out by the method of principal components. The resulting clustering in the coordinates of the first two components (in total they explain 65% of the data variation) shows significant differences in soil properties under different experimental options. To assess the efficiency of the use of nutrients depending on the dose of the polymer, a differential indicator was proposed – the additional efficiency of the use of nutrients (E). It was estimated from the increase in yield relative to the zero dose of the polymer per unit reduction in the concentration of this element in the soil according to the proposed formula. It is shown that the polymer use in fertilizer gives a statistically significant increase in the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat.

Keywords: southern chernozems, slow-release fertilizers, biopolymers, principal component method.

ВВЕДЕНИЕ

Максимальное удовлетворение потребностей культурных растений в питательных элементах в течение вегетации при минимальном причинении вреда природной среде от использования минеральных удобрений при одновременном экономическом эффекте их действия является первоочередной задачей системы удобрения полевых культур ([Иванов, 2022](#); [Kareem et al., 2021](#)).

Озимая пшеница в аграрном секторе экономики России без всякого преувеличения является основной, базовой культурой среди стратегических сельскохозяйственных культур. Особенности ее интенсивного возделывания предполагают поэтапное внесение (подкормки) минеральными удобрениями (в оптимуме до трех раз) в течение вегетации согласно фенофазам. Сокращение числа подкормок с однократным внесением удобрения представляется крайне актуальным, как с позиций экономической рентабельности, так и экологической оправданности.

В результате усилившегося диспаритета цен в настоящее время особенно актуальными являются проблемы снижения применяемых доз минеральных удобрений, выбора наилучших форм удобрений и их сочетаний, сроков и способов их внесения ([Иванов, 2022](#)). Наиболее перспективным в этой связи представляется совместное использование минеральных удобрений и биоорганических соединений полимерной природы, которые оказывают определенное влияние на свойства почвы, процессы высвобождения элементов из удобрения и поглощения их растениями.

Вследствие обострения беспрецедентных вызовов в природопользовании, наблюдаемого в настоящее время, академиком А.Л. Ивановым в 2019 г. были сформулированы актуальные задачи в Крупном Научном Проекте (КНП) ([Иванов, 2022](#)), включая развитие подходов для эффективного использования удобрений. Природно-климатические вызовы отошли на второй план, уступив место грандиозным социально-политическим и тесно связанным с ними глобальным экономическим вызовам. Однако субъективно навязываемая системным санкционным давлением технологическая деградация в условиях дефицита ресурсов отнюдь не означает, что российский научно-производственный аграрный потенциал

не самодостаточен. Напротив, актуализируются цели: не “выживания”, а “развития” отечественных систем природопользования ([Перевертин и др., 2022](#)).

Несмотря на значительный прогресс в адаптации прогрессивных систем агрохимических воздействий, применение традиционных физических форм минеральных удобрений не позволяет использовать весь потенциал вносимых элементов питания, так как процессы неполной денитрификации, иммобилизация и выщелачивание (вымывание) основных макроэлементов (NPK), наряду с действием уреазы, приводят к непроизводительным потерям питательных веществ в почве. Кроме экономических потерь имеют место негативные экологические последствия – эвтрофикация водоемов, эмиссия парниковых газов. Другими словами, до трети массы действующего вещества используемых форм минеральных удобрений попросту “не доходит до потребителя” – сельхозкультуры ([Lawrencja, 2021](#)). Они же обременяют энергоемкость мероприятий по транспортировке, хранению и внесению традиционных препаративных форм.

От этих недостатков свободны системы применения удобрений пролонгированного действия ([Мухина и др., 2021](#)). Имеющийся интеллектуальный ([Занилов и др., 2017](#)) и технологический задел позволяют организовать производство удобрений пролонгированного действия, не уступающих зарубежным аналогам ([Баматов, 2018](#); [Баматов и др., 2022](#)). Наиболее перспективным представляется совместное использование минеральных удобрений и биоорганических соединений полимерной природы, которые оказывают определенное влияние на свойства почвы, процессы высвобождения элементов из удобрения и поглощения их растениями. Добавление к минеральным удобрениям органических полимеров, путем их поверхностного нанесения на гранулы, позволяет снизить производственные затраты на использование удобрений, получить высокие и качественные урожаи, мобилизовать процессы трансформации соединений, содержащих, например, азот и фосфор, нивелировать процессы, связанные с деградацией плодородия ([Косолопова и др., 2017](#); [Мухина и др., 2021](#); [Налиухин и др., 2017](#); [Уткин и др., 2021](#)).

В настоящей работе в качестве модификатора минеральных

удобрений использовался один из наиболее распространенных синтетических полимеров – поливиниловый спирт (ПВС). В отличие от часто используемого природного биополимера – крахмала, поливиниловый спирт имеет свои преимущества. Он нетоксичен, легко растворяется в воде. Рабочей гипотезой механизма действия полимера на удобрение является замедление растворения питательных элементов из минерального удобрения, что может повышать эффективность его применения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в 2022 г. в производственных условиях в Курском районе Ставропольского края в хозяйстве ООО “СтавАгроКом” на черноземе южном карбонатном. С целью определения эффекта модификации минеральных удобрений полимерным веществом в виде поливинилового спирта (ПВС) был проведен полевой эксперимент на посеве озимой пшеницы сорта “Княгиня Ольга”. Площадь делянки составляла 10 000 м². Повторность – 3-кратная. Подкормку проводили комплексным минеральным удобрением – азофоска (NPK – 16 : 16 : 16) из расчета 200 кг/га. Дата внесения модифицированного удобрения – 12 марта 2022 г. Полимерная модификация минерального удобрения азофоска 16 : 16 : 16 проводилась в лабораторных условиях следующим образом: в стакане в объемном соотношении 1 : 1 растворяли минеральное удобрение в воде, температуру раствора поднимали до 50 °С, перемешивая раствор магнитной мешалкой. Параллельно во втором стакане растворяли поливиниловый спирт (биоразлагаемый синтетический полимер) 1 : 5 в воде, при температуре 70 °С и перемешивали магнитной мешалкой (600 об./сек.). Перемешивание продолжали до тех пор, пока полимер полностью не растворился и не образовалась желеобразная суспензия. Растворенное удобрение из первой емкости объединяли с растворенным полимером и к полученному раствору добавляли лимонную кислоту в соотношении 1 : 10 к массе полимера. После добавления лимонной кислоты увеличивали скорость магнитной мешалки до 900 об./сек. Температуру химического раствора поднимали до 80 °С и продолжали перемешивать с помощью магнитной мешалки до получения однородной суспензии, затем остужали продукт

до комнатной температуры в течение 24 часов и далее помещали в холодильную камеру на 24 часа. После этого охлажденный продукт подвергали вакуумному фильтрованию. Далее высушенный материал прессовали таблеточным прессом в таблеточную форму.

Норма расхода полимера составляла – 3, 5 и 7 кг на 1 тонну удобрения (табл. 1).

Таблица 1. Схема эксперимента

Table 1. Experiment scheme

Варианты
Дата отбора образцов – 13.06.2022
Вариант 1 – контроль
Вариант 2 – азофоска
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3кг/т
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т
Дата отбора образцов – 16.07.2022
Вариант 1 – контроль
Вариант 2 – азофоска
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3кг/т
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т

Отдельно отметим, что методика модификации удобрения в лабораторных условиях изложена в рамках данной работы для демонстрации технологической воспроизводимости при фундаментальных исследованиях почвенных свойств. Производственное внедрение вплоть до коммерческих объемов возможно на основе разработанного нами оригинального реактора (Патент RU 2 667 453 (13) С1) ([Баматов И.М., 2018](#)). На основе разработанного Программного обеспечения (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021666912 от 12 октября 2021 г.) ([Баматов, Баматов, 2021](#)), где микропроцессор может управлять режимами реактора для достижения программируемых режимов пролонгации модифицируемых форм минеральных

удобрений, подана новая заявка на патентную защиту (№ 2021128628/10(060678 от 30.09.2021. Заявитель: ФИЦ ФБГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева). Получаемые модификации конкурентноспособны по сравнению с зарубежными импортозамещаемыми аналогами ([Бамагов и др., 2022](#); [Bamatov et al., 2019](#); [Bamatov et al., 2020](#); [Перевертин и др., 2022b](#)). Однако еще раз заметим, что в рамках данной работы преследовалась фундаментальная цель изучения почвенных свойств при внесении удобрений пролонгированного действия – макроэлементов, во многом обеспечивающих качество урожайной продукции, – фосфора и калия.

Перед проведением подкормки (12.03.2022) отбирались почвенные образцы для сравнения влияния азофоски и полимера на агрохимические показатели почвы.

Программой исследования предусматривался отбор почвенных образцов в два календарных срока (13.06.2022 и 16.07.2022), которые соответствовали молочно-восковой и полной спелости зерна, в которую проводили уборку.

Исследованная почва, чернозем южный карбонатный, в среднем на всех делянках характеризовалась содержанием гумуса $1.95 \pm 0.26\%$, рН водной вытяжки 8.4 ± 0.1 , содержанием NaCl 53 ± 5 мг/л. Отобранные образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали на мельнице. Анализы проводились согласно принятым в агрохимической практике методикам: гумус почвы (по Тюрину в модификации ЦИНАО); подвижные формы фосфора (P_2O_5) – ГОСТ 20205-91 (по Мачигину); подвижные формы калия (K_2O) – ГОСТ 20205-91 (по Мачигину); обменные кальций (Ca) и магний (Mg) – трилометрический метод; обменный натрий (Na) – ГОСТ 26950-86; ионы натрия и хлора (NaCl) – кондуктометрический метод; рН водной вытяжки (pH_{H_2O}) – ГОСТ 26423-85; удельная электропроводимость почвы (σ) – ГОСТ 26423-85.

Для кластеризации почвенных свойств применяли метод главных компонент. Для оценки статистической значимости отличий результатов между вариантами полевых опытов с различной дозой полимера использовали два статистических теста: параметрический критерий Стьюдента для двух независимых выборок с

предположением о нормальности распределений измеряемых величин; и непараметрический критерий Уилкоксона (Манна–Уитни) для независимых выборок с предположением о том, что вид исходных распределений неизвестен. Значимыми считали отличия при выполнении обоих критериев на уровне доверительной вероятности 95%. Статистическую обработку и визуализацию данных проводили на специализированном языке программирования R.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики полученного урожая в разных вариантах опыта (табл. 2.) показывают, что на контрольном участке и в варианте с применением минерального удобрения без добавления полимера было собрано одинаковое минимальное количество урожая – 32.8 ц/га. На фоне повышенной по калию и высокой по фосфору обеспеченности почвы прироста урожая от внесения минерального удобрения (200 кг/га) не наблюдалось, т. е. внесение азофоски не было эффективным. В вариантах опыта с добавлением в азофоску полимера урожай был тем выше, чем выше доза полимера. Также значимо повышалось качество клейковины (индекс ИДК). Содержание белка и клетчатки имели тенденцию к снижению с ростом урожая.

Объяснением для роста урожая с увеличением дозы полимера в удобрении может быть увеличение эффективности использования питательных элементов растением за счет их замедленного высвобождения, согласно исходному предположению о действии полимера на растворимость удобрения в почве. Для проверки данной гипотезы был проведен анализ образцов почвы. Измеренные почвенные показатели представлены в таблице 3.

Оценка общего варьирования каждого почвенного свойства (между датами измерения и повторными измерениями) показала, что стандартное отклонение от среднего значения для обменного кальция, электропроводности и подвижного калия составляло менее 10%. Варьирование в содержании подвижного фосфора до 25% и наибольшие изменения наблюдались для обменного магния (до 75%) и обменного натрия (до 100%).

Таблица 2. Характеристики урожая озимой пшеницы в вариантах опыта (среднее значение и стандартное отклонение для 3 аналитических повторностей)

Table 2. Yield characteristics of winter wheat in experimental variants (mean value and standard deviation for 3 analytical replicates)

Вариант опыта	Белок, %	Клетчатка, %	ИДК	Урожай, кг/га
Контроль	14.4 ± 0.1	25.2 ± 0.5	59 ± 2	3 280
Азофоска	15.2 ± 0.3	28.4 ± 0.6	60 ± 2	3 280
Азофоска + ПЗ	15.2 ± 0.2	27.7 ± 0.8	53 ± 2	3 480
Азофоска + П5	14.3 ± 0.0	26.0 ± 0.2	57 ± 1	3 560
Азофоска + П7	14.4 ± 0.1	27.3 ± 0.1	49 ± 1	3 980

Изменения агрохимических показателей почвы под действием азофоски и полимера не имели прямой зависимости ни от времени, ни от дозы полимера. Например, в контрольном варианте опыта (без внесения удобрения) наблюдалось снижение подвижных форм K_2O и P_2O_5 в почве в первом периоде наблюдения (март–июнь) и, наоборот, увеличение запаса этих питательных элементов во втором периоде наблюдения (июнь–июль).

Наблюдаемые разнонаправленные колебания в свойствах почвы и ее элементном составе могут объясняться сложными взаимосвязями процессов в почве. Так, усиливающиеся биосинтетические процессы роста и развития растений озимой пшеницы могут приводить к пополнению подвижных форм питательных элементов из запасов “валовых” форм этих элементов за счет действия экссудатов корней ([Мухина и др., 2021](#)). Использование азофоски может усиливать минерализацию гумусовых соединений чернозема, вызывая процесс кислотного разложения под действием присутствующих в составе азофоски сильных минеральных кислот – азотной, фосфорной и серной. В то же время полимер, покрывающий гранулы удобрения, растворяясь со временем, может нелинейно терять свой эффект на высвобождение в почвенный раствор минеральных кислот удобрения.

Таблица 3. Агрохимические показатели южного чернозема (средние арифметические значения и стандартные отклонения для 3 аналитических повторностей измерения)

Table 3. Agrochemical indicators of the southern chernozem (arithmetic means and standard deviations for 3 analytical measurement repetitions)

Варианты	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	σ
	мг/кг		мг-экв/100 г почвы		ммоль/100 г почвы	мСм/м
Дата отбора образцов – 22.03.2022						
До внесения азофоски и ПВС	18.5 ± 2.0	329 ± 4	6.7 ± 0.3	0.2 ± 0.1	0.08 ± 0.02	0.107 ± 0.003
Дата отбора образцов – 13.06.2022						
Вариант 1 – контроль	16.5 ± 1.7	273 ± 8	7.0 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.11 ± 0.02	0.082 ± 0.056
Вариант 2 – азофоска	12.8 ± 1.5	303 ± 6	6.3 ± 0.1	2.0 ± 0.2	0.11 ± 0.01	0.102 ± 0.005
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3 кг/т	12.8 ± 1.5	288 ± 13	6.7 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.09 ± 0.01	0.097 ± 0.006
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т	15.8 ± 1.5	295 ± 9	6.3 ± 0.1	3.0 ± 1.0	0.02 ± 0.02	0.107 ± 0.001
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т	16.5 ± 1.0	248 ± 6	6.4 ± 0.2	1.4 ± 0.2	0.04 ± 0.01	0.124 ± 0.006

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Варианты	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	σ
	мг/кг		мг-экв/100 г почвы		ммоль/100 г почвы	мСм/м
Дата отбора образцов – 16.07.2022						
Вариант 1 – контроль	27.0 ± 1.0	344 ± 11	6.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.16 ± 0.02	0.105 ± 0.008
Вариант 2 – азофоска	11.5 ± 1.0	282 ± 8	6.3 ± 0.2	3.8 ± 0.2	0.14 ± 0.02	0.100 ± 0.004
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3 кг/т	15.5 ± 1.0	303 ± 6	6.0 ± 0.1	2.0 ± 0.2	0.62 ± 0.05	0.098 ± 0.007
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т	13.8 ± 1.2	251 ± 10	6.1 ± 0.1	0.8 ± 0.2	0.48 ± 0.04	0.102 ± 0.002
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т	13.5 ± 1.7	293 ± 6	5.9 ± 0.1	1.2 ± 0.2	0.12 ± 0.02	0.109 ± 0.001

Таким образом, изученные почвенные свойства по отдельности, в отличие от урожая и его характеристик, ввиду сложных взаимосвязей, очевидно, не коррелируют с дозой полимера в удобрении. Чтобы оценить общую картину изменения почвенных свойств, на рисунке 1 приведен результат анализа почвенных свойств методом главных компонент. Полученная кластеризация в координатах первых двух компонент (в сумме объясняют 65% варьирования данных) показывает значимые различия в свойствах почвы между разными вариантами опыта. Однако из этой группировки нельзя напрямую сделать выводы о причинах роста урожая с повышением дозы.

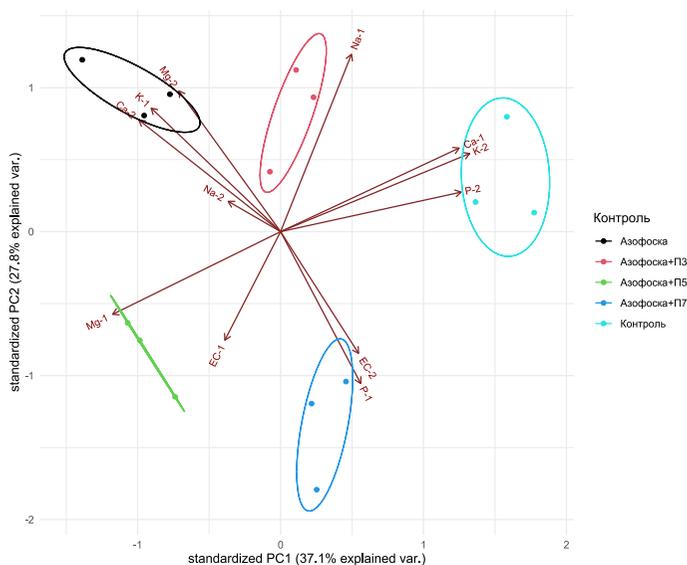


Рис. 1. Группировка вариантов опыта в координатах двух первых главных компонент. Индекс 1 – результаты первого периода исследования, 2 – второго периода.

Fig. 1. Grouping of experience options in the coordinates of the first two principal components. Index 1 – the results of the first period of the study, 2 – the second period.

Известно, что применение удобрений и особенно различных агроメリорантов и полимерных соединений может приводить к увеличению кислотности почв.

Как было показано выше, рост урожая положительно коррелирует с дозой полимера в удобрении. Предполагаемой причиной может быть увеличение эффективности использования питательных элементов в присутствии полимера. Баланс подвижных форм питательных элементов в почве к концу сезона вегетации связан как с их поглощением растениями, так и с переходом между подвижной и неподвижной формами, и с их выносом за пределы пахотного горизонта, из которого отбирали образцы почвы для анализа.

Оценить эти компоненты по отдельности не представляется возможным в данном опыте, тем не менее, чтобы проверить гипотезу об увеличении эффективности использования питательных элементов с дозой полимера, в данном опыте был рассчитан дифференциальный показатель – добавочная эффективность использования питательных элементов (**E**). Добавочная эффективность оценивалась по прибавке урожая относительно нулевой дозы полимера на единицу снижения концентрации данного элемента в почве согласно формуле (1):

$$E_i = \frac{k_1(Y_i - Y_0)}{k_2(C_i^0 - C_i^2) + a_i}, \quad (1)$$

где $i \in \{0, 3, 5, 7\}$ – вариант опыта и соответствует дозе полимера в удобрении; Y_i – урожай в i -ом варианте опыта; C_i^0 – начальная концентрация питательного элемента в i -ом варианте опыта, C_i^2 – конечная концентрация питательного элемента. Внесение питательного элемента с удобрением учитывается коэффициентом a_i , в данном случае во всех вариантах с удобрением вносили по 32 кг/га азота, фосфора и калия. Коэффициент k_1 – вынос элемента с урожаем, выраженный в кг элемента/кг урожая (при расчетах взяты значения 0.011 для фосфора и 0.027 для калия). Коэффициент $k_2 = 3\,900$ т/га применяется для приведения величины **E** в безразмерную (кг выноса с урожаем/кг расхода питательного элемента), а также для возможности его представления в процентах,

предполагая, что плотность пахотного чернозема в слое 0.3 м равна 1.3 кг/м³.

Расчет добавочной эффективности использования удобрений от дозы полимера производили для двух питательных элементов – фосфора и калия, поскольку именно эти два элемента могут испытывать непосредственное влияние добавляемого полимера на их растворение (рис. 2).

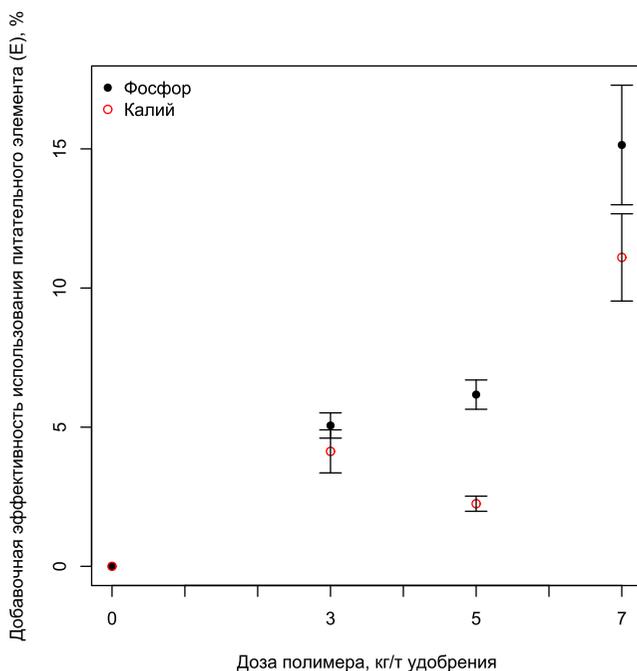


Рис. 2. Добавочная эффективность использования питательных элементов (фосфора и калия), выраженная в процентах выноса питательного элемента с прибавкой урожая от его расхода в почве к концу вегетации. Расчет эффективности показан со стандартным отклонением для 3 аналитических повторностей исходных измерений.

Fig. 2. Additional efficiency of use of nutrients (phosphorus and potassium), expressed as a percentage of the removal of a nutrient with an increase in yield from its consumption in the soil by the end of the growing season. Efficiency calculation shown with standard deviation for 3 analytical replicates of the original measurements.

Показано, что фактор использования полимера в удобрении дает статистически значимое увеличение эффективности использования фосфора и калия озимой пшеницей (для фосфора по критериям Уилкоксона $p = 0.009$, Стьюдента $p = 0.0006$, для калия, соответственно, $p = 0.009$ и $p = 0.003$). При этом для обоих элементов показано, что доза 7 кг/т минерального удобрения имеет максимальный эффект, который статистически значимо по обоим критериям (для фосфора $p = 0.027$ и $p = 0.012$, для калия $p = 0.026$ и $p = 0.004$) отличается от эффектов доз 3 и 5 кг/т.

ВЫВОДЫ

В условиях беспрецедентных вызовов, обозначенных академиком РАН А.Л. Ивановым, актуализируются цели: не “выживание”, а “развитие” отечественных систем природопользования, в частности, внедрение прогрессивных систем применения удобрений пролонгированного действия.

Для производства препаративных форм, не уступающих зарубежным аналогам, имеется интеллектуальный и технологический задел, однако требуются фундаментальные исследования изменения почвенных свойств.

Внедрение органического компонента в состав минерального удобрения положительно коррелирует с продуктивностью озимой пшеницы. Почвенные свойства в поставленном опыте изменялись таким образом, что достоверно кластеризовались согласно вариантам опыта.

Добавление полимера в минеральное удобрение дает значимую добавочную эффективность (предложена оригинальная формула) использования макроэлементов (фосфора и калия), что согласуется с предполагаемым механизмом действия полимера на удобрение – замедление высвобождения питательных элементов в почве. Таким образом, включение полимерных соединений, в частности ПВС, в систему минерального питания растений, а также производство соответствующих смесей удобрений на высоком технологическом уровне отвечает требованиям современного сельскохозяйственного производства в условиях импортозамещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баматов И.М.* Реактор для непрерывного перемешивания жидких растворов: Описание изобретения к патенту RU 2 667 453 (13) С1, 19.09.2018 Бюл. № 26. 5 с.
2. *Баматов И.М., Баматов Д.М.* Программное обеспечение системы управления температурными режимами многостадийного реактора для непрерывного смешивания жидкостей: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021666912 от 12 октября 2021 г.
3. *Баматов И.М., Перевертин К.А.* Использование оригинальной технологии получения НРК-удобрений пролонгированного действия (с биополимерным покрытием гранул вносимого вещества) и его сравнение с зарубежным аналогом // Материалы конф. “Современные агротехнологии в садоводстве и питомниководстве”. М.: ФГБНУ ФНЦ Садоводства, 2022 г.
4. *Ефимов В.Н., Донских И.Н., Царенко В.П.* Система удобрения: учебник для вузов. М.: Изд-во КолосС, 2002. 320 с.
5. *Занилов А.Х., Шилова Е.П.* Инновационные приемы повышения эффективности минерального питания растений. М.: ФГБНУ Росинформагротех, 2017. 132 с.
6. *Иванов А.Л.* (ред.) Актуальные научные задачи стратегии адаптации потенциала землепользования России в современных условиях беспрецедентных вызовов (экономический кризис, изменения климата, кризис глобальных тенденций природопользования) / Научный отчет по проекту. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2022. 415 с.
7. *Косолапова А. И., Возжаев В.И., Лейних П.А.* Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от применения минеральных удобрений // Агрономия. Пермский аграрный вестник. 2017. № 3 (19). С. 76–80.
8. *Мухина М.Т., Боровик Р.А., Коршунов А.А.* Удобрения пролонгированного действия: основные этапы и направления развития // Плодородие. 2021. № 4. С. 77–82. DOI: [10.25680/S19948603.2021.121.23](https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.23).
9. *Налиухин А.Н., Завалин А.А., Силуянова О.В., Белозеров Д.А.* Влияние биоудобрений и известкования на продуктивность вико-овсяной смеси и изменение микробоценоза дерново-подзолистой почвы // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 6. С. 21–26.
10. *Перевертин К.А., Баматов И.М.* Адаптация землепользования России в современных условиях беспрецедентных вызовов (пример удобрений пролонгированного действия) // Доклад на Международной научно-практической конференции посвященной 110-летию

Длительного полевого опыта РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, М., 2022а.

11. *Перевертин К.А., Баматов И.М.* Актуальность использования минеральных удобрений пролонгированного действия (экологические аспекты) // Сборник трудов V Международной научно-практической конференции ICER – 2022 “Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания”. Брест, 2022б. С. 210–216.

12. *Уткин А.А.* Химия минеральных удобрений. Иваново: ФГБОУ ВО ИГСХА им. акад. Д.К. Беляева, 2021. 91 с.

13. *Bamatov I.M., Sapayev Kh.Kh., Rumyantsev E.V.* Coating of npk fertiliser with astratch-based biodegradable polymer by using a v-star reactor // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 816. P. 318–322.

14. *Bamatov I.M., Rumyantsev E.V., Arsanov M.M.* The influence of biopolymer coated fertilizer on the agrochemical parameters of the soil // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 869. P. 315–320.

15. *Kareem S.A., Dere I., Gungula D.T., Andrew F.P., Saddiq A.M., Adebayo E.F., Tame V.T., Kefas H.M., Joseph J., Patrick D.O.* Synthesis and Characterization of Slow-Release Fertilizer Hydrogel Based on Hydroxy Propyl Methyl Cellulose, Polyvinyl Alcohol, Glycerol and Blended Paper // Gels. 2021. Vol. 7. No. 262. P. 1–16. DOI: [10.3390/gels7040262](https://doi.org/10.3390/gels7040262).

16. *Lawrencia D., Wong S.K., Low D.Y.S., Goh B.H., Goh J.K., Ruktanonchai U.R., Soottitantawat A., Lee L.H., Tang S.Y.* Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release // Plants. 2021. Vol. 10. No. 238. P. 1–25. DOI: [10.3390/plants10020238](https://doi.org/10.3390/plants10020238).

REFERENCES

1. *Bamatov I.M., Reaktor dlya nepreryvnogo peremeshivaniya zhidkikh rastvorov* (Reactor for continuous mixing of liquid solutions): description of the invention to the patent RU 2 667 453 (13) S1, 19.09.2018 Byul. No. 26, 5 p.
2. *Bamatov I.M., Bamatov D.M., Programmnoe obespechenie sistemy upravleniya temperaturnymi rezhimami mnogostadijnogo reaktora dlja nepreryvnogo smeshivaniya zhidkostej: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM* (Software application for the temperature control system of a multi-stage reactor for continuous mixing of liquids: Certificate of state registration of computer programs), No. 2021666912, 12.10. 2021.
3. *Bamatov I.M., Perevertin K.A., Ispol'zovanie original'noi tekhnologii polucheniya NPK-udobrenii prolongirovannogo deistviya (s biopolimernym*

pokrytiem granul vnosimogo veshchestva) i ego sravnenie s zarubezhnym analogom (The use of the original technology for obtaining NPK-fertilizers of prolonged action (with a biopolymer coating of the granules of the applied substance) and its comparison with a foreign analogue), Proc. Conference “Sovremennye agrotekhnologii v sadovodstve i pitomnikovodstve” (“Modern agrotechnologies in horticulture and nursery production”), Moscow: FGBNU FNTs Sadovodstva, 2022.

4. Efimov V.N., Donskikh I.N., Tsarenko V.P., *Sistema udobreniya* (Fertilizer system). Moscow: Izd-vo KolosS, 2002, 320 p.

5. Zanirov A.Kh., Shilova E.P., *Innovatsionnye priemy povysheniya effektivnosti mineral'nogo pitaniya rastenii* (Innovative methods for increasing the efficiency of plant mineral nutrition), Moscow: FGBNU Rosinformagrotekh, 2017, 132 p.

6. Ivanov A.L. (Ed.), *Aktual'nye nauchnye zadachi strategii adaptatsii potentsiala zemlepol'zovaniya Rossii v sovremennykh usloviyakh bespretsedentnykh vyzovov (ekonomicheskii krizis, izmeneniya klimata, krizis global'nykh tendentsii prirodopol'zovaniya)* (Actual scientific tasks of the strategy for adapting the land use potential of Russia in the current conditions of unprecedented challenges (economic crisis, climate change, crisis of global trends in nature management)), Scientific report, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2022, 415 p.

7. Kosolapova A.I., Vozzhaev V.I., Leinikh P.A., *Urozhainost' i kachestvo zerna yarovoi pshenitsy v zavisimosti ot primeneniya mineral'nykh udobrenii* (Yield and grain quality of spring wheat depending on the use of mineral fertilizers), *Agronomiya. Permskii agrarnyi vestnik*, 2017, No. 3 (19), pp. 76–80.

8. Mukhina M.T., Borovik R.A., Korshunov A.A., *Udobreniya prolongirovannogo deistviya: osnovnye etapy i napravleniya razvitiya* (Slow-release fertilizers: main stages and directions of development), *Plodородie*, 2021, No. 4, pp. 77–82, DOI: [10.25680/S19948603.2021.121.23](https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.23).

9. Naliukhin A.N., Zavalin A.A., Siluyanova O.V., Belozarov D.A., *Vliyanie bioudobrenii i izvestkovaniya na produktivnost' viko-ovsyanoi smesi i izmenenie mikrobotsenoza dernovo-podzolistoi pochvy* (The effect of biofertilizers and liming on the productivity of vetch-oat mixture and changes in the microbial community of soddy-podzolic soil), *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*, 2017, No. 6, pp. 21–26.

10. Perevertin K.A., Bamatov I.M., *Adaptatsiya zemlepol'zovaniya Rossii v sovremennykh usloviyakh bespretsedentnykh vyzovov (primer udobrenii prolongirovannogo deistviya)* (Adaptation of land use in Russia in the current conditions of unprecedented challenges (example of slow-release fertilizers), Proc. Intern. Scien. and Pract. Conf. to the 110th anniversary of the Long-term

field experience of the RSAU-MTAA named after K.A. Timiryazev), Moscow, 2022.

11. Perevertin K.A., Bamatov I.M., *Aktual'nost' ispol'zovaniya mineral'nyh udobrenij prolongirovannogo dejstviya (jekologicheskie aspekty)* (The relevance of the use of mineral fertilizers of prolonged action (environmental aspects)), Proc. Intern. Scien. and Pract. Conf. ICEP – 2022 “Actual scientific, technical and environmental problems of habitat conservation”, Brest, 2022, pp. 210–216.

12. Utkin A.A., *Khimiya mineral'nykh udobrenii* (Chemistry of mineral fertilizers), Ivanovo: Ivanovo State Agricultural Academy named after D.K. Belyaev, 2021, 91 p.

13. Bamatov I.M., Sapaev Kh.Kh., Rumyantsev E.V., Coating of NPK fertiliser with a starch-based biodegradable polymer by using a v-star reactor, *Key Engineering Materials*, 2019, Vol. 816, pp. 318–322.

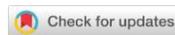
14. Bamatov I.M., Rumyantsev E.V., Arsanov M.M., The influence of biopolymer coated fertilizer on the agrochemical parameters of the soil, *Key Engineering Materials*, 2020, Vol. 869, pp. 315–320.

15. Kareem S.A., Dere I., Gungula D.T., Andrew F.P., Saddiq A.M., Adebayo E.F., Tame V.T., Kefas H.M., Joseph J., Patrick D.O., Synthesis and Characterization of Slow-Release Fertilizer Hydrogel Based on Hydroxy Propyl Methyl Cellulose, Polyvinyl Alcohol, Glycerol and Blended Paper, *Gels*, 2021, Vol. 7, No. 262, pp. 1–16, DOI: [10.3390/gels7040262](https://doi.org/10.3390/gels7040262).

16. Lawrencia D., Wong S.K., Low D.Y.S., Goh B.H., Goh J.K., Ruktanonchai U.R., Soottitantawat A., Lee L.H., Tang S.Y., Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release, *Plants*, 2021, Vol. 10, No. 238, pp. 1–25. DOI: [10.3390/plants10020238](https://doi.org/10.3390/plants10020238).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-110-137



Ссылки для цитирования:

Пономарев К.О., Первушина А.Н., Коротаева К.С., Юртаев А.А., Петухов А.С., Табакаев Р.Б., Шаненков И.И. Влияние биоугля на развитие яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и кислотность дерново-подзолистой почвы в Западной Сибири // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 110-137. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-110-137

Cite this article as:

Ponomarev K.O., Pervushina A.N., Korotaeva K.S., Yurtaev A.A., Petuhov A.S., Tabakaev R.B., Shanenkov I.I., Biochar influence on the development of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) and acidity of soddy-podzolic soil in Western Siberia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 113, pp. 110-137, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-110-137

Благодарность:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания № FEWZ-2021-0014 (Научно-технические основы и прикладные решения комплексной энерготеплотехнологической переработки биомассы для обеспечения экологически чистых технологий в энергетике и металлургии). Эксперименты проводились на оборудовании, закупленном в рамках программы академического лидерства Тюменского университета (программа стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”). Авторы выражают признательность С.С. Волковой за помощь в аналитической работе с использованием ресурсов НИЦ “Природопользование и физико-химические исследования” (Тюменский государственный университет).

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment No. FEWZ-2021-0014 (Scientific and technological foundations and applied solutions for integrated energy and heat processing of biomass to ensure environmentally friendly technologies in power engineering and metallurgy). The experiments were performed on the equipment purchased under the Academic Leadership Program of Tyumen University (Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030”). The authors are grateful to S.S. Volkova for the help in analytical work using the resources of the Research Center “Nature Management and Physical and Chemical Research” (Tyumen State University).

Влияние биоугля на развитие яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и кислотность дерново-подзолистой почвы в Западной Сибири

© 2022 г. К. О. Пономарев*, А. Н. Первушина,
К. С. Коротаева, А. А. Юртаев, А. С. Петухов,
Р. Б. Табакаев, И. И. Шаненков

Тюменский государственный университет, Россия,
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6,

*<https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: k.o.ponomarev@utmn.ru.

Поступила в редакцию 18.11.2022, после доработки 21.11.2022,
принята к публикации 27.12.2022

Резюме: Цель исследования состояла в установлении влияния внесения в почву биоуглей, полученных из разных, характерных для Западной Сибири органических отходов сельского хозяйства (коровий навоз, солома), деревообрабатывающей (сосновые опилки) и пищевой промышленности (скорлупа кедрового ореха) на морфометрические характеристики растений (на примере яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.)) и свойства дерново-подзолистой почвы. Оценка влияния осуществлялась в ходе проведения вегетационных экспериментов с использованием климатических камер. В результате вегетационных исследований установлено, что внесение всех отмеченных видов биоуглей в слой почвы приводит к достоверному ($p < 0.05$) росту морфометрических характеристик яровой пшеницы. Например, внесение в почву биоугля из соломы приводит к увеличению высоты растения до узла на 19%, а количества листьев – на 8%, по сравнению с контролем. Внесение в почву биоугля из навоза увеличило длину корня яровой пшеницы на 35%, по сравнению с контролем. При использовании биоуглей из соломы и навоза наблюдается снижение кислотности почвы (увеличение pH с 7.1 до 7.4 и 7.8 соответственно). Результаты комплексного анализа свидетельствуют о том, что агрономические преимущества у биоуглей из пшеничной соломы и отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота проявляются лучше, чем у биоуглей из сосновых опилок и скорлупы кедровых орехов, что связано с более высокой концентрацией питательных элементов и веществ с щелочной реакцией (карбонатов и оксидов) в них. Полученные результаты полезны с точки зрения оценки экологических рисков использования биоугольных мелиорантов в почвах, типичных для

бореального биоклиматического пояса. Последующие эксперименты, включающие в себя исследования совместного внесения биоуглей и удобрений в почву, позволят разработать рекомендации по использованию технологии термической конверсии региональных органических отходов в мелиоранты, улучшающие качество почв и повышающие их плодородие.

Ключевые слова: органические отходы, биоугольный мелиорант, вегетационный опыт, морфометрические показатели пшеницы, почвенные свойства.

Biochar influence on the development of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) and acidity of soddy-podzolic soil in Western Siberia

© 2022 K. O. Ponomarev*, A. N. Pervushina, K. S. Korotaeva, A. A. Yurtaev, A. S. Petuhov, R. B. Tabakaev, I. I. Shanenkov

University of Tyumen,

6 Volodarskogo Str., 625003 Tyumen, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: k.o.ponomarev@utmn.ru.

Received 18.11.2022, Revised 21.11.2022, Accepted 27.12.2022

Abstract: The paper purpose was to establish the effect of applying biochar obtained from various organic wastes of agriculture (cow manure, straw), woodworking (pine sawdust) and food industry (pine nut shell), which are typical of Western Siberia, on the morphometric characteristics of plants (using spring wheat (*Triticum aestivum* L.) as the example) and the soddy-podzolic soil properties. The assessment of biochar influence was performed by a series of vegetation experiments using climatic chambers. As a result, it was found that the introduction of all the noted biochar types into the soil layer leads to a significant ($p < 0.05$) increase in the morphometric characteristics of spring wheat. For example, when applying the straw biochar to the soil, it results in growing the plant height to the node by 19%, while the number of leaves increased by 8% compared to the control variant. The introduction of biochar from manure leads to the increased length of the spring wheat root by 35%. Moreover, straw and manure biochars contribute to the reduction of soil acidity (increase in pH values from 7.1 to 7.4 and 7.8, respectively). The results of the comprehensive analysis indicate that the agronomic advantages of application of biochars obtained from wheat straw and cattle manure are better compared to biochars from pine sawdust and pine nut shells, which is

due to higher concentration of nutrients and substances with alkaline reaction (carbonates and oxides) in the former. The results obtained are useful from the point of view of assessing the environmental risks when applying biochar ameliorants in soils typical of the boreal bioclimatic zone. Subsequent experiments, including studies of the joint application of biochars and fertilizers to the soil, will make it possible to develop recommendations for applying the thermal conversion technology for recycling the regional organic waste into ameliorants that improve soil quality and increase its fertility.

Keywords: organic wastes, biochar ameliorant, greenhouse experiment, wheat morphometric parameters, soil properties.

ВВЕДЕНИЕ

Большая часть органических отходов, которая образуется в процессе деятельности пищевой, аграрной и деревообрабатывающей промышленности, чаще всего не используется и утилизируется путем сжигания ([Wang et al., 2014](#); [Mohan et al., 2018](#); [Sarauer et al., 2019](#)). При таком неэффективном способе утилизации окружающая среда загрязняется летучей золой и парниковыми газами, доля которых в атмосфере растет ([Kumar et al., 2022](#)). Одним из решений проблемы утилизации биоотходов предприятий без вреда для окружающей среды является их депонирование в почве, способствующее секвестрации углерода. Однако важно понимать, что процесс разложения в почве органического вещества в исходном виде занимает 5–10 лет, при этом в атмосферу продолжают выделяться CO₂ и другие газы ([Mohan et al., 2018](#); [Adeodun et al., 2022](#)). Поэтому в настоящее время с целью решения ряда вопросов, таких как утилизация отходов, снижение эмиссии парниковых газов, долгосрочное связывание углерода в почве, а также повышение плодородия почвы и урожайности культур, органическое сырье подвергают термохимической обработке с получением биоугля ([Zhang et al., 2016](#); [Amin, 2020](#)).

Биоуголь представляет собой нелетучий углеродистый остаток, получаемый в процессе пиролиза биомассы (т. е. в условиях высоких температур и ограниченного доступа кислорода) ([Zhang et al., 2016](#); [Gabhane et al., 2020](#)). Внесение биоугля в почву положительно влияет на поглощение элементов питания растениями. Это доказывает многолетний опыт фермеров из Европы, Америки,

Китая, Австралии и Индии ([Zhang et al., 2016](#)). Исследователями неоднократно установлено, что использование биоугля улучшает физико-химические свойства почвы ([Igaz et al., 2018](#); [Juriga, Šimanský, 2019](#)) и ее водно-воздушный режим ([Baiamonte et al., 2015](#); [Juriga et al., 2021](#)), повышает урожайность сельскохозяйственных культур ([Graber et al., 2010](#); [Cornelissen et al., 2018](#)) и за счет секвестрации углерода приводит к сокращению выбросов парниковых газов ([Amin, 2020](#); [Sun et al., 2022](#)). Однако известны и противоположные результаты ([Wardle et al., 2008](#); [Griffin et al., 2017](#); [Juriga, Šimanský, 2019](#); [Meschewski et al., 2019](#)), когда авторы показывали, что использование биоугля в качестве мелиоранта приводит к ухудшению микробиологической активности почвы, снижению морфометрических характеристик растений и увеличению эмиссии парниковых газов. Негативное влияние объясняется постепенным истощением щелочных соединений из углеродистого мелиоранта ([Cornelissen et al., 2018](#)) и снижением сорбционной способности ([Ren et al., 2018](#)), которое может возникнуть из-за закрытия пор почвенными агрегатами ([Beusch, 2021](#)). Слабо выраженный положительный эффект или его отсутствие от внесения биоуглей в почву можно наблюдать при их неверном подборе для конкретного региона.

Вид сырья, из которого получают биоуголь, и способ его переработки необходимо подбирать с учетом особенностей рассматриваемого региона – вида характерных отходов и свойств почвы. Различия в почвенных свойствах приводят к разному эффекту от внесения биоугля ([Zhao et al., 2013](#); [Beusch, 2021](#)). Среди почв Западной Сибири часто встречаются легкие по гранулометрическому составу ([Гвоздецкий, 1973](#); [Kapitonova et al., 2019](#)). Влагоудерживающая способность таких почв низкая ([Kapitonova et al., 2019](#)). При инфильтрации атмосферных осадков полезные вещества просачиваются через такую почву, становясь недоступными для растений. Благодаря высокой пористости и удельной площади гидрофильной поверхности биоугля внесение его в почву с легким гранулометрическим составом позволит повысить запасы продуктивной влаги ([Белашов, Рижия, 2020](#)). Но с экономической точки зрения поиск сырья и его переработка или закупка и транспортировка коммерческого биоугля могут быть нецелесообразны, по сравне-

нию с получаемым эффектом от применения биоугольного мелиоранта в сельском хозяйстве ([Jones et al., 2012](#)). Использование органических отходов предприятий рассматриваемого региона с переработкой их в биоуголь является важным аспектом.

Все виды биомассы (растительные, древесные и сельскохозяйственные органические отходы), характерные для Западной Сибири, отличаются элементарным составом (органической и минеральной частями) и свойствами. Поэтому использование биоугля, полученного из разных видов биомассы, в качестве мелиоранта, очевидно, окажет разное влияние на удержание элементов и сохранение питательных веществ в почвах ([Yao et al., 2012](#); [Zhao et al., 2013](#)). Биоуголь из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота имеет высокую концентрацию питательных веществ, а количество золы и ее состав в сырье обеспечивают биоуглю щелочные свойства ([Cantrell et al., 2012](#); [Zhao et al., 2013](#)). Биоуголь из рисовой соломы ускоряет нитрификацию, снижает выщелачивание азота из почвы и ее объемную плотность, улучшает поглощение азота, фосфора и калия растениями и повышает урожайность пшеницы и проса ([Zhao et al., 2014](#); [He et al., 2016](#)). Известно ([Igalavithana et al., 2020](#)), что биоуголь, полученный из сосновых опилок, отличается более высоким потенциалом поглощения CO₂, чем, например, биоуголь из шлама бумажной фабрики. Также стоит добавить, что хорошо изучено влияние биоуглей из опилок березы и осины на свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы ([Rizhiya et al., 2015](#)), которая является типичной для Западной Сибири, и мало изучено влияние биоуглей из древесины сосны, которая также характерна для данного природного региона. О влиянии на свойства почвы биоугля, полученного из такого растительного материала как скорлупа орехов, известно мало. Изучение скорлупы в качестве одного из перспективных видов биомассы для получения биоугля требует дальнейших исследований как минимум из-за щелочного рН ([Ahmadou et al., 2019](#)).

Таким образом, внесение в почву биоугля из органических отходов сельского хозяйства, деревообрабатывающей и пищевой промышленности играет важную роль в экологическом менеджменте за счет управления местными отходами, повышения плодородия почвы и смягчения последствий изменения климата ([Amin,](#)

[2020](#); [Joseph et al., 2021](#)). Поскольку выбор сырья зависит от конкретного региона, то из определенных и типичных для Западной Сибири органических отходов – соломы, навоза, опилок, скорлупы кедровых орехов – важно выбрать те, которые будут обладать наибольшими агрономическими преимуществами. Поэтому цель исследования состояла в установлении влияния внесения в почву биоугля, полученного из разных, характерных для Западной Сибири органических отходов, на морфометрические характеристики растений и почвенные свойства.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Почву для экспериментов отбирали из пахотного горизонта (0–20 см) с территории Биостанции ТюмГУ, расположенной в Нижнетавдинском районе Тюменской области. Территория биостанции характеризуется дерново-подзолистой почвой с лесами (сосновыми, осиновыми, березовыми) и болотными комплексами ([Гвоздецкий, 1973](#)). Почву перед экспериментами высушивали до воздушно-сухого состояния в вентилируемом помещении, просеивали через сито с диаметром отверстий 10 мм, чтобы удалить посторонние включения (камни, корни и пр.), и анализировали согласно аттестованным методикам: кислотность по водной вытяжке – ГОСТ 26423-85, кислотность по солевой вытяжке – ГОСТ 26483-85, гигроскопическая влажность – ГОСТ 28268-89. Плотность сложения почвы определили с использованием алюминиевого бюкса. Гранулометрический состав исследован с использованием анализатора размеров частиц Pario.

В экспериментах использовали исходную почву (контроль) и почвы, в которые внесли биоугли. Биоугли получили из характерной для Западной Сибири биомассы: сосновые опилки, скорлупа кедровых орехов, отходы жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоз), пшеничная солома. Для этого биомассу помещали в реактор, после чего осуществляли ее нагрев до 600 °С со скоростью 10 °С в минуту ([Tabakaev et al., 2019](#)). В процессе нагрева происходило термическое разложение биомассы с выделением летучих продуктов в виде паров смолы и газа, которые удалялись из реактора через трубку, соединенную с колбой. В колбе пары смолы конденсировались, газ собирался в пробоотборной емкости

для дальнейшего анализа. При достижении требуемого значения температуры внутри реактора производили выдержку (15 минут) до полного визуального окончания процесса, после чего нагрев прекращали, реактор охлаждался естественным способом. При остывании реактора до комнатной температуры биоуголь извлекался из реактора для дальнейшего использования и изучения его характеристик. В таблице 1 приведен элементный состав и зольность биоуглей.

Таблица 1. Элементный состав и зольность биоуглей
Table 1. Elemental composition and ash content of biochars

Биоуголь	C^d	H^d	N^d	S^d	O^d	A^d
	%					
Сосновые опилки	88.87	2.45	0.13	0.02	4.06	4.47
Скорлупа кедровых орехов	88.89	2.21	0.41	0.01	6.66	1.82
Отходы жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоз)	52.62	1.53	1.74	0.14	8.79	35.18
Пшеничная солома	78.61	1.99	1.01	0.03	4.87	13.49

Примечание. Данные в таблице приведены на сухую массу: C^d – углерод; H^d – водород; N^d – азот; S^d – сера; O^d – кислород; A^d – зольность.

В таблице 2 приведены содержащиеся в биоуглях активные микроэлементы. Фосфор представлен в сравнительной форме по отношению к доле фосфора в опилках из-за отсутствия калибровочного элемента в атомно-эмиссионном спектрофотометре.

Полученные в результате пиролиза биоугли массой 21.38 г смешали с 2 кг почвы и внесли в вегетационные сосуды, что соответствовало дозе биоугля 30 т/га.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в вытяжке из рассматриваемых биоуглей

Table 2. Content of trace elements in extracts from the considered biochars

Микроэлемент, мг/кг	Сосновые опилки	Скорлупа кедровых орехов	Отходы жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоз)	Пшеничная солома
<i>K</i>	1 565	2 993	36 500	15 560
<i>Ca</i>	2 773	242	28 175	9 258
<i>Mg</i>	284	78	7 448	2 437
<i>Na</i>	132	47	6 643	1 196
<i>Fe</i>	216	14.4	5 320	2 335
<i>Al</i>	185	7.1	1 187	2 012
<i>Si</i>	164	25	994	848
<i>P</i> / <i>P</i> _{опилки}	1.0	2.0	241.0	89.5

Примечание. *K* – калий; *Ca* – кальций; *Mg* – магний; *Na* – натрий; *Fe* – железо; *Al* – алюминий; *Si* – кремний; *P* – фосфор.

Доза внесения в почву биоугля выбрана согласно рекомендациям исследователей ([Lehmann et al., 2011](#); [Литвинович и др., 2016](#); [Agbede, Oyewumi, 2022](#)). Установлено, что использование биоугля в количестве 30 т/га привело к достижению наиболее высокого (по сравнению с дозами внесения 0, 10 и 20 т/га) урожая ([Agbede, Oyewumi, 2022](#)), достоверной прибавке сухой биомассы ([Литвинович и др., 2016](#)), увеличению микробной биомассы ([Lehmann et al., 2011](#)). В каждый сосуд добавили 20 семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта “Ирень”. Сосуды с посаженной культурой помещались в климатическую камеру роста Jeio Tech GC-1000TLH (Jeio Tech (Lab Companion), Южная Корея) в рандомизированном порядке. Климатическая камера позволяла регулировать освещенность, температуру и влажность. Освещенность в камере поддерживалась на уровне 20 кЛк на верхней полке

и 8 кЛк на нижней в течение 16 часов в сутки (режим “день”), 0 кЛк в течение 8 часов (режим “ночь”). Температуры в режимах “день” и “ночь” выбирались в фенологических фазах прорастания, кущения и выхода в трубку: 15/12 °С, 18/15 °С, 23/16 °С соответственно. Влажность почвы поддерживали на уровне 60% от полной влагоемкости. Vegetационные сосуды располагались в шахматном порядке случайным образом. Каждые два дня пинцетом удаляли сорняки, поливали растения дистиллированной водой и меняли местами сосуды, расположенные на верхней и нижней полках, с целью идентичности условий эксперимента. Через 10 дней после посева определили всхожесть семян и проредили растения до 15 культур в емкости. В конце эксперимента были определены морфометрические характеристики растений: высота растения, количество листьев, длина корней и масса его отдельных органов (листья, стебель, корень). Масса почвы, биоугля, растений измерялась с использованием весов ViBRA LN-3202RCE (ViBRA (Shinko Denshi), Япония) с погрешностью 0.01 г. Повторность опыта – четырехкратная. Статистическая обработка данных проводилась с помощью дисперсионного анализа. В зависимости от закона распределения (нормальная, логнормальная или другие модели) использовались параметрические критерии Стьюдента, Родинона или Колмогорова–Смирнова, U – критерий Манна–Уитни. Достоверные статистические различия между средними значениями приняты при уровне надежности $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные для Западной Сибири дерново-подзолистые почвы обладают низким содержанием питательных веществ ([Rizhiya et al., 2015](#)). Наличие питательных веществ, влаги и воздуха в почве является важным фактором урожайности и развития растений. В таблице 3 приведены свойства почвы-контроля и ее химико-физические характеристики.

Результаты анализа свойств почвы (табл. 3) показали, что почва является нейтральной, что характерно для пахотного горизонта дерново-подзолистых почв ([Rizhiya et al., 2015](#)).

Таблица 3. Свойства почвы-контроля и ее химико-физические характеристики

Table 3. Control soil properties and its chemical and physical characteristics

ρ , г/см ³	W , %	$ПВ$, %	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	C , %	H , %	N , %	S , %
1.4	1.3	30.16	7.22	6.52	0.90	0.00	0.07	0.01

Примечание. ρ – плотность сложения почвы; W – гигроскопическая влажность почвы; $ПВ$ – полная влагоемкость на 100 г абсолютно сухой почвы; pH_{H_2O} – кислотность по водной вытяжке; pH_{KCl} – кислотность по солевой вытяжке; C – углерод; H – водород; N – азот; S – сера.

По гранулометрическому составу (песок – 87%, пыль – 4%, глина – 9%), установленному методом Ферре, почва относится к супесям. Такие почвы пропускают значительную долю влаги и содержат малое количество органических веществ ([Капитонова, Аксарина, 2019](#)). Формирование нарушенных почвенных массивов в Сибири вызвано факторами антропогенного и природного характера. Известно ([Новохатин, 2015](#)), что при формировании урожая пшеницы особое влияние в вегетационный период оказывает обеспеченность зерновой культуры влагой и теплом. Так как 80% Западной Сибири составляет Западно-Сибирская равнина, то открытость местности к северу приводит к беспрепятственному проникновению арктических воздушных масс. Последнее оказывает влияние на промерзание почвы (глубина промерзания может достигать 2 м, а оттаивание начинается только с апреля ([Новохатин, 2015](#))). Таким образом, характерные для Западной Сибири почвы требуют мелиорации и погашения кислотности.

Внесение биоугля в исходную почву привело к увеличению лабораторной всхожести семян на 5–15% (табл. 4).

Рост всхожести семян при добавлении биоугля в почву отмечалось и другими исследователями ([Jabborova et al., 2021](#)). Данные (табл. 4) свидетельствуют о том, что добавление в почву биоугля из разных видов биомассы будет оказывать различное, но в то же время положительное влияние на экологические функции почвы и морфофизиологическое состояние растений. Морфометрические характеристики растений в исследуемых почвах опреде-

лены после вегетационного опыта, который длился 39 дней (рис. 1).

Таблица 4. Лабораторная всхожесть семян в исследуемых почвах
Table 4. Laboratory germination of seeds in studied soils

Вариант почвенной смеси	<i>A</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>
<i>BC</i> , %	82.5	93.8	97.5	90	87.5

Примечание. *BC* – лабораторная всхожесть семян; *A* – почва-контроль; *B1* – почва с биоуглем из сосновых опилок; *B2* – почва с биоуглем из скорлупы кедровых орехов; *B3* – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоза); *B4* – почва с биоуглем из пшеничной соломы.

Достоверное ($p < 0.05$) увеличение высоты пшеницы (h_m) установлено при внесении в почву биоугля из сосновых опилок, отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота и пшеничной соломы (рис. 1). Наибольшая высота стебля наблюдалась у растений в почвах с навозом и пшеничной соломой, что, по-видимому, связано с высоким содержанием в них *K* и *Si* (табл. 2). При этом высокая концентрация и других неорганических компонентов (*Ca*, *Mg*, *Na*, *Fe*, *Al*, *P*) в биоуглях привела к достоверному ($p < 0.05$) росту количества листьев (n_l) у растений. Рост надземной массы яровой пшеницы свидетельствует о достаточном уровне влажности почвы и лучшем потреблении азота растениями. В таких условиях процессы фотосинтеза и дыхания будут протекать интенсивнее.

Длина корня пшеницы (l_r) достоверно ($p < 0.005$) выше в почве с биоуглем из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота. Внесение этого биоугля в почву привело к значительному увеличению в ней азота и фосфора, что обычно достигается внесением в почву соответствующих удобрений. Наличие этих элементов в почве ведет к интенсивному развитию корневой системы, что обеспечивает охват растением необходимой площади питания и в дальнейшем получение более высокого урожая пшеницы. Результаты согласуются с выводами других авторов

([Jaborova et al., 2021](#)), показавших, что даже внесение 1% биоугля в почву влияет на развитие растений и рост их морфометрических характеристик.

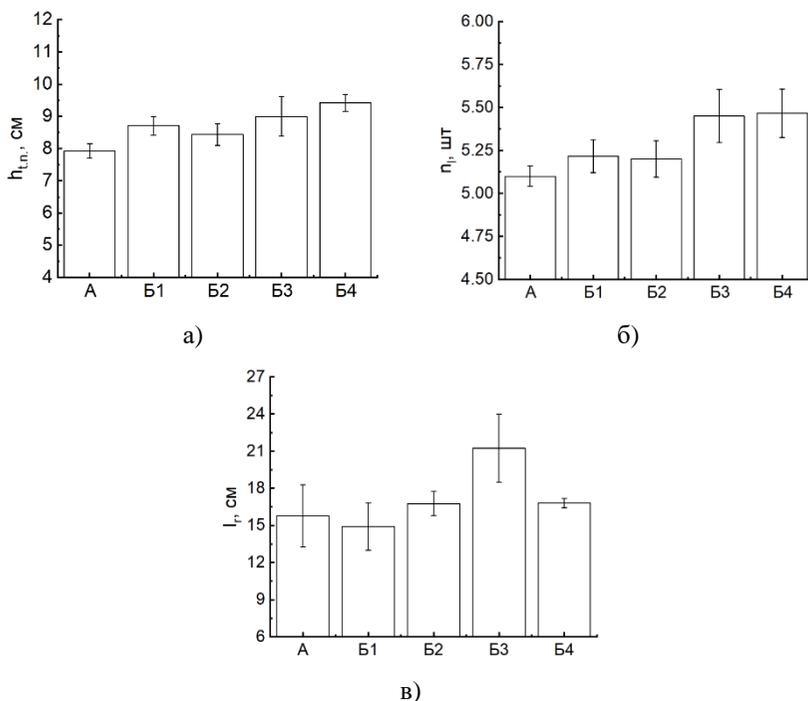


Рис. 1. Зависимости **а)** высоты пшеницы до верхнего узла, из которого выходит флаговый лист, **б)** количества листьев и **в)** длины корня растения от варианта почвенной смеси, в которой она выращена: А – почва-контроль; Б1 – почва с биоуглем из сосновых опилок; Б2 – почва с биоуглем из скорлупы кедровых орехов; Б3 – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоза); Б4 – почва с биоуглем из пшеничной соломы.

Fig. 1. Dependences of **a)** the wheat height to the top node from which the flag leaf emerges, **б)** the number of leaves and **в)** the root length on the soil mixture variant: А – soil-control; Б1 – soil with biochar from pine sawdust; Б2 – soil with biochar from pine nut shells; Б3 – soil with biochar from cattle waste (manure); Б4 – soil with biochar from wheat straw.

Результаты исследований показали, что внесение биоугля в почву не вызвало достоверного прироста по массе растения. Однако можно заметить (рис. 2), что добавление в почву биоугля из соломы привело к увеличению массы растения на 22.5%.

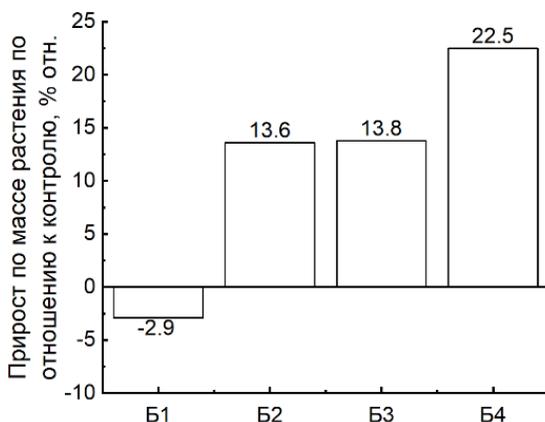


Рис. 2. Прирост по массе культуры по отношению к контролю: А – почва-контроль; Б1 – почва с биоуглем из сосновых опилок; Б2 – почва с биоуглем из скорлупы кедровых орехов; Б3 – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоза); Б4 – почва с биоуглем из пшеничной соломы.

Fig. 2. Growth in culture weight relative to control: А – soil-control; Б1 – soil with biochar from pine sawdust; Б2 – soil with biochar from pine nut shells; Б3 – soil with biochar from cattle waste (manure); Б4 – soil with biochar from wheat straw.

Эти данные свидетельствуют о том, что при необходимости увеличения массы культуры, например, для контролируемого выпаса скота, необходимо фокусироваться на выборе сырья, из которого будет изготовлен биоуголь, вносимый в почву. Установлено, что отношения масс отдельных частей растения к его общей массе и к массе корня достоверно не отличались. Исключением являлось отношение массы стебля пшеницы к общей массе растения в почве с биоуглем из навоза, которое достоверно ($p < 0.05$) увеличилось по сравнению с контролем (рис. 3).

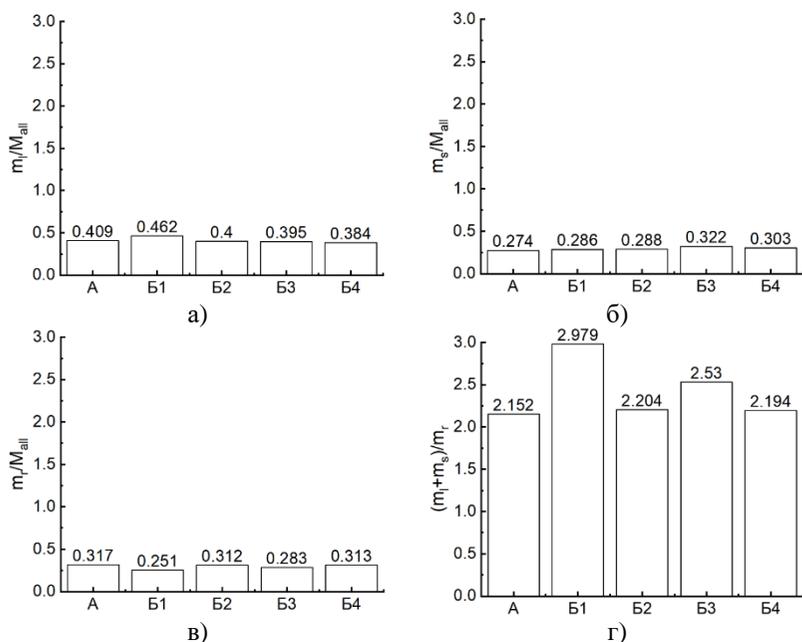


Рис. 3. Зависимости отношения масс **а)** листьев, **б)** стеблей, **в)** корней к общей массе растения, и **г)** отношения массы надземной части пшеницы к массе ее подземной (корневой) части: А – почва-контроль; Б1 – почва с биоуглем из сосновых опилок; Б2 – почва с биоуглем из скорлупы кедровых орехов; Б3 – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоза); Б4 – почва с биоуглем из пшеничной соломы.

Fig. 3. Ratio of the masses of **а)** leaves, **б)** stems **в)** roots to the total plant mass and **г)** ratio of the wheat aerial part mass to its underground (root) part mass: А – soil-control; Б1 – soil with biochar from pine sawdust; Б2 – soil with biochar from pine nut shells; Б3 – soil with biochar from cattle waste (manure); Б4 – soil with biochar from wheat straw.

Крепкие стебли и длинные корни пшеницы в почве с биоуглем из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота могут быть объяснены малой величиной отношения углерода к азоту (C : N) в этом биоугле. В биоуглях из навоза, соломы, скорлупы орехов и опилок отношение C : N составляло 30, 78, 215 и 687 соответственно. Отсюда следует, что в почве Б3 наблюдается накоп-

ление минеральных форм азота, которые легко усваиваются растениями ([Novak et al., 2010](#); [Tangmankongworakoon, 2019](#); [Dubrovina, 2021](#)). Результаты согласуются с данными других ученых ([Geng et al., 2022](#)). Отношение кислорода к углероду (O : C) у биоугля из навоза в 2–4 раза выше, чем у других биоуглей, что характеризует биоуголь как гидрофильный, адсорбционный материал, но ниже 0.4, что указывает на его высокую стабильность и большой период полураспада ([Leng et al., 2019](#)). Эти свойства биоугля обеспечивают долгосрочное удержание влаги в почве (снижаются риски пересыхания и переувлажнения). Таким образом, применение биоугля, полученного из отходов крупного рогатого скота, позволяет улучшить водно-воздушный баланс в почве и обеспечить растение полезным питанием. Это является важным результатом, так как корневая система яровой пшеницы менее развита по сравнению с другими злаковыми культурами ([Алферов, 2020](#)), а использование биоугля приводит к развитию подземных органов растения, что благоприятно влияет на достижение и поглощение корнями питательных элементов и влаги.

Внесение биоугля в почву влияет на ее свойства ([Dubrovina, 2021](#)). Изменение кислотности почвы является важным фактором, потому что от pH почвы зависит микробная активность и доступность питательных веществ для растений. Показано (рис. 4), что кислотность исследуемой почвы после экспериментов составляла 7.1 и 6.3 по водной и солевой вытяжкам, соответственно.

Кислотность контроля после экспериментов составляла 7.1 по водной и 6.3 по солевой вытяжкам (рис. 4). После уборки растений показатель pH почвы с опилками и скорлупой кедровых орехов немного уменьшился (кислотность увеличилась) до 7.0 (6.2 по солевой) и 7.1 (6.2 по солевой) соответственно. Кислотность почв с навозом и соломой уменьшилась, т. к. pH увеличился до 7.8 (7 по солевой) и 7.4 (6.6 по солевой) соответственно. Сдвиг pH почвы на 0.2–0.4 единицы считается значительным влиянием биоугля на кислотность почвы ([Wang et al., 2014](#)). Улучшение pH почвы некоторыми биоуглями связано с тем, что при пиролизе сырья кислотные функциональные группы и катионы в нем образуют щелочные вещества (карбонаты и оксиды), которые нейтрализуют ионы водорода в почве, снижая ее кислотность.

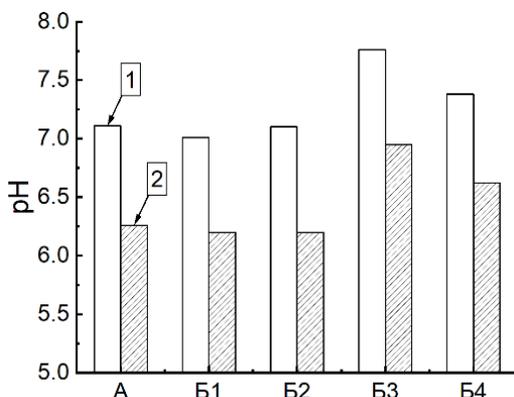


Рис. 4. Кислотность почвы по водной (1) и солевой (2) вытяжкам: А – почва-контроль; Б1 – почва с биоуглем из сосновых опилок; Б2 – почва с биоуглем из скорлупы кедровых орехов; Б3 – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота (навоза); Б4 – почва с биоуглем из пшеничной соломы.

Fig. 4. Soil acidity according to water (1) and salt (2) extracts. A – soil-control; B1 – soil with biochar from pine sawdust; B2 – soil with biochar from pine nut shells; B3 – soil with biochar from cattle waste (manure); B4 – soil with biochar from wheat straw.

В биоугле из соломы и навоза щелочных веществ было больше, что видно по высокому содержанию золы (табл. 2). Таким образом, сдвиг реакции (pH) почвы в сторону щелочности с СМВ и WSB может быть связан как с добавлением основных катионов в почву (например, таких как K, Ca, Mg, Na), так и декарбоксилированием органических анионов и аммонификацией лабильного органического азота в биоуглях (Raza et al., 2021). В таких условиях буферность почвы при внесении в нее биоугля повышается, что согласуется с результатами других исследователей (Geng et al., 2022). Поэтому на почвах с внесенным биоуглем из соломы и навоза урожайность будет выше (Cornelissen et al., 2018). Однако определение урожайности и оценка продолжительности влияния биоугля на кислотность почвы требует проведения дополнительных специальных экспериментов, в том числе с добавлением традиционных (азотных, фосфорных, калийных) удобрений (Jones et al., 2012).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований установлено, что при внесении в дерново-подзолистый слой почвы биоугля, полученного из характерных для Западной Сибири органических отходов, наблюдается достоверный ($p < 0.05$) рост морфометрических характеристик яровой пшеницы. При использовании биоуглей из соломы и навоза в качестве мелиорантов достигается снижение кислотности почвы. Агрономические преимущества у биоуглей из пшеничной соломы и отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота проявляются лучше, чем у биоуглей из сосновых опилок и скорлупы кедровых орехов, что связано с более высокой концентрацией питательных элементов и щелочных веществ в них. Полученные результаты полезны с точки зрения оценки экологических рисков использования биоугольных мелиорантов в почвах, типичных для бореального биоклиматического пояса. Последующие эксперименты, включающие в себя опыты совместного внесения биоугля и удобрений в почву, позволят разработать рекомендации по использованию технологии термической конверсии региональных органических отходов в мелиоранты, улучшающие качество почв и повышающие их плодородие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алферов А.А.* Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы. М.: РАН, 2020. 184 с. DOI: [10.25680/VNIIA.2019.21.92.152](https://doi.org/10.25680/VNIIA.2019.21.92.152).
2. *Балашов Е.В., Рижия Е.Я.* Влияние биоугля на плотность сложения и водоудерживающую способность супесчаной дерново-подзолистой почвы разной степени окультуренности // *Агрофизика*. 2020. № 2. С. 1–9. DOI: [10.25695/AGRPH.2020.02.01](https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.02.01).
3. *Гвоздецкий Н.А.* Физико-географическое районирование Тюменской области. М.: Изд-во Московского университета, 1973. 246 с.
4. *Капитонова О.А., Аксарина К.Ю.* О некоторых физико-химических свойствах почв песчаных обнажений северных районов Западной Сибири // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2019. Т. 10. № 1. С. 28–38. DOI: [10.17816/edgcc10533](https://doi.org/10.17816/edgcc10533).
5. *Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по

размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // Агрохимия. 2016. № 9. С. 46–53.

6. *Новохатин В.В.* Биоклиматические ресурсы Северного Зауралья // Аграрный вестник Урала. 2015. № 8 (138). С. 22–28

7. *Adeodun S.A., Sangodoyin A.Y., Ogundiran M.B.* Optimisation of biochar yield from sorted wood wastes as sustainable alternatives to burning to ash // Ecological Chemistry and Engineering S. 2022. Vol. 29. No. 1. P. 15–26. DOI: [10.2478/eces-2022-0003](https://doi.org/10.2478/eces-2022-0003).

8. *Agbede T.M., Oyewumi A.* Benefits of biochar, poultry manure and biochar–poultry manure for improvement of soil properties and sweet potato productivity in degraded tropical agricultural soils // Resources, Environment and Sustainability. 2022. Vol. 7. P. 100051. DOI: [10.1016/j.resenv.2022.100051](https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100051).

9. *Ahmadou A., Napoli A., Durand N., Montet D.* High physical properties of cashew nut shell biochars in the adsorption of mycotoxins // International Journal of Food Research. 2019. Vol. 6. P. 18–28. DOI: [10.2478/eces-2022-0003](https://doi.org/10.2478/eces-2022-0003).

10. *Amin A.E.E.A.Z.* Bagasse pith-vinasse biochar effects on carbon emission and nutrient release in calcareous sandy soil // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2020. Vol. 20. No. 1. P. 220–231. DOI: [10.1007/s42729-019-00125-9](https://doi.org/10.1007/s42729-019-00125-9).

11. *Baiamonte G., De Pasquale C., Marsala V., Cimò G., Alonzo G., Crescimanno G., Conte P.* Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments // Journal of Soils and Sediments. 2015. Vol. 15. No. 4. P. 816–824. DOI: [10.1007/s11368-014-0960-y](https://doi.org/10.1007/s11368-014-0960-y).

12. *Beusch C.* Biochar as a soil ameliorant: how biochar properties benefit soil fertility – a review // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2021. Vol. 09. No. 10. P. 28–46. DOI: [10.4236/gep.2021.910003](https://doi.org/10.4236/gep.2021.910003).

13. *Cantrell K.B., Hunt P.G., Uchimiya M., Novak J.M., Ro K.S.* Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar // Bioresource Technology. 2012. Vol. 107. P. 419–428. DOI: [10.1016/j.biortech.2011.11.084](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084).

14. *Cornelissen G., Jubaedah, Nurida N.L., Hale S.E., Martinsen V., Silvani L., Mulder J.* Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 634. No. 0806. P. 561–568. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.380](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.380).

15. *Dubrovina I.A.* Effects of biochar on the agrochemical indicators and enzyme activity of soils in the middle taiga of Karelia // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 12. P. 1957–1966. DOI: [10.1134/S106422932112005X](https://doi.org/10.1134/S106422932112005X).

16. *Gabhane J.W., Bhange V.P., Patil P.D., Bankar S.T., Kumar S.* Recent trends in biochar production methods and its application as a soil health conditioner: a review // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. No. 7. P. 1–21. DOI: [10.1007/s42452-020-3121-5](https://doi.org/10.1007/s42452-020-3121-5).
17. *Geng N., Kang X., Yan X., Yin N., Wang H., Pan H., Yang Q., Lou Y., Zhuge Y.* Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022. Vol. 232. P. 113241. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.113241](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113241).
18. *Graber E.R., Harel Y.M., Kolton M., Cytryn E., Silber A., David D.R., Tsechansky L., Borenshtein M., Elad Y.* Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media // *Plant and Soil*. 2010. Vol. 337. No. 1. P. 481–496. DOI: [10.1007/s11104-010-0544-6](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0544-6).
19. *Griffin D.E., Wang D., Parikh S.J., Scow K.M.* Short-lived effects of walnut shell biochar on soils and crop yields in a long-term field experiment // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2017. Vol. 236. P. 21–29. DOI: [10.1016/j.agee.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.002).
20. *He L., Liu Y., Zhao J., Bi Y., Zhao X., Wang S., Xing G.* Comparison of straw-biochar-mediated changes in nitrification and ammonia oxidizers in agricultural oxisols and cambosols // *Biology and Fertility of Soils*. 2016. Vol. 52. No. 2. P. 137–149. DOI: [10.1007/s00374-015-1059-3](https://doi.org/10.1007/s00374-015-1059-3).
21. *Igalavithana A.D., Choi S.W., Shang J., Hanif A., Dissanayake P.D., Tsang D.C.W., Kwon J.H., Lee K.B., Ok Y.S.* Carbon dioxide capture in biochar produced from pine sawdust and paper mill sludge: Effect of porous structure and surface chemistry // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 739. P. 139845. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.139845](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139845).
22. *Igaz D., Šimanský V., Horák J., Kondrlová E., Domanová J., Rodný M., Buchkina N.P.* Can a single dose of biochar affect selected soil physical and chemical characteristics? // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2018. Vol. 66. No. 4. P. 421–428. DOI: [10.2478/johh-2018-0034](https://doi.org/10.2478/johh-2018-0034).
23. *Jaborova D., Ma H., Bellingrath-Kimura S.D., Wirth S.* Impacts of biochar on basil (*Ocimum basilicum*) growth, root morphological traits, plant biochemical and physiological properties and soil enzymatic activities // *Scientia Horticulturae*. 2021. Vol. 290. P. 110518. DOI: [10.1016/j.scienta.2021.110518](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110518).
24. *Jones D.L., Rousk J., Edwards-Jones G., DeLuca T.H., Murphy D.V.* Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three-year field trial // *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. Vol. 45. P. 113–124. DOI: [10.1016/j.soilbio.2011.10.012](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.012).
25. *Joseph S., Cowie A.L., Van Zwieten L., Bolan N., Budai A., Buss W., Cayuela M.L., Graber E.R., Ippolito J.A., Kuzyakov Y., Luo Y., Ok Y.S.,*

- Palansooriya K.N., Shepherd J., Stephens S., Weng Z., Lehmann J.* How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar // *GCB Bioenergy*. 2021. Vol. 13. No. 11. P. 1731–1764. DOI: [10.1111/gcbb.12885](https://doi.org/10.1111/gcbb.12885).
26. *Juriga M., Aydin E., Horák J., Chlupík J., Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Balashov E.V., Šimanský V.* The importance of initial application and reapplication of biochar in the context of soil structure improvement // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2021. Vol. 69. No. 1. P. 87–97. DOI: [10.2478/johh-2020-0044](https://doi.org/10.2478/johh-2020-0044).
27. *Juriga M., Šimanský V.* Effects of biochar and its reapplication on soil pH and sorption properties of silt loam haplic Luvisol // *Acta Horticulturae et Regioteecturae*. 2019. Vol. 22. No. 2. P. 65–70. DOI: [10.2478/ahr-2019-0012](https://doi.org/10.2478/ahr-2019-0012).
28. *Kapitonova O.A., Aksarina K.Y., Yu A.K.* On some physical and chemical properties of soils of sandy outcrops of the West Siberian northern regions // *Environmental dynamics and global climate change*. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 28–37. DOI: [10.17816/edgcc10533](https://doi.org/10.17816/edgcc10533).
29. *Kumar A., Bhattacharya T., Mukherjee S., Sarkar B.* A perspective on biochar for repairing damages in the soil–plant system caused by climate change-driven extreme weather events // *Biochar*. 2022. Vol. 4. No. 1. P. 1–23. DOI: [10.1007/s42773-022-00148-z](https://doi.org/10.1007/s42773-022-00148-z).
30. *Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D.* Biochar effects on soil biota – A review // *Soil biology and biochemistry*. 2011. Vol. 43. No. 9. P. 1812–1836. DOI: [10.1016/j.soilbio.2011.04.022](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022).
31. *Leng L., Huang H., Li H., Li J., Zhou W.* Biochar stability assessment methods: A review // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 647. P. 210–222. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.07.402](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402).
32. *Meschewski E., Holm N., Sharma B.K., Spokas K., Minalt N., Kelly J.J.* Pyrolysis biochar has negligible effects on soil greenhouse gas production, microbial communities, plant germination, and initial seedling growth // *Chemosphere*. 2019. Vol. 228. P. 565–576. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2019.04.031](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.031).
33. *Mohan D., Abhishek K., Sarswat A., Patel M., Singh P., Pittman C.U.* Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration – a sustainable solution to crop-residue burning in India // *RSC Advances*. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 508–520. DOI: [10.1039/c7ra10353k](https://doi.org/10.1039/c7ra10353k).
34. *Novak J.M., Busscher W.J., Watts D.W., Laird D.A., Ahmedna M.A., Niandou M.A.S.* Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandiodult // *Geoderma*. 2010. Vol. 154. No. 3–4. P. 281–288. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.10.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.014).

35. *Raza S., Zamanian K., Ullah S., Kuzyakov Y., Virto I., Zhou J.* Inorganic carbon losses by soil acidification jeopardize global efforts on carbon sequestration and climate change mitigation // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 315. P. 128036. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.128036](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128036).
36. *Ren X., Yuan X., Sun H.* Dynamic changes in atrazine and phenanthrene sorption behaviors during the aging of biochar in soils // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. No. 1. P. 81–90. DOI: [10.1007/s11356-016-8101-3](https://doi.org/10.1007/s11356-016-8101-3).
37. *Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Belinets A.S., Balashov E.V.* Effect of biochar on the properties of loamy sand Spodosol soil samples with different fertility levels: A laboratory experiment // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No. 2. P. 192–200. DOI: [10.1134/S1064229314120084](https://doi.org/10.1134/S1064229314120084).
38. *Sarauer J.L., Page-Dumroese D.S., Coleman M.D.* Soil greenhouse gas, carbon content, and tree growth response to biochar amendment in western United States forests // *GCB Bioenergy*. 2019. Vol. 11. No. 5. P. 660–671. DOI: [10.1111/gcbb.12595](https://doi.org/10.1111/gcbb.12595).
39. *Sun Y., Lyu H., Cheng Z., Wang Y., Tang J.* Insight into the mechanisms of ball-milled biochar addition on soil tetracycline degradation enhancement: Physicochemical properties and microbial community structure // *Chemosphere*. 2022. Vol. 291. P. 132691. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.132691](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132691).
40. *Tabakaev R., Ibraeva K., Astafev A., Dubinin Y., Yazykov N., Zavorin A., Yakovlev V.* Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis // *Fuel*. 2019. Vol. 245. P. 29–38. DOI: [10.1016/j.fuel.2019.02.049](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.049).
41. *Tangmankongworakoon N.* An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose // *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 37–44. DOI: [10.1007/s40093-019-0267-5](https://doi.org/10.1007/s40093-019-0267-5).
42. *Wang Y., Yin R., Liu R.* Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2014. Vol. 110. No. 1. P. 375–381. DOI: [10.1016/j.jaap.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.10.006).
43. *Wardle D.A., Nilsson M.C., Zackrisson O.* Fire-derived charcoal causes loss of forest humus // *Science*. 2008. Vol. 320. No. 5876. P. 629. DOI: [10.1126/science.1154960](https://doi.org/10.1126/science.1154960).
44. *Yao Y., Gao B., Zhang M., Inyang M., Zimmerman A.R.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil // *Chemosphere*. 2012. Vol. 89. No. 11. P. 1467–1471. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2012.06.002](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002).

45. Zhang D., Yan M., Niu Y., Liu X., van Zwieten L., Chen D., Bian R., Cheng K., Li L., Joseph S., Zheng J., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Filley T.R., Pan G. Is current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture? // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2016. Vol. 226. P. 25–32. DOI: [10.1016/j.agee.2016.04.010](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.010).
46. Zhao L., Cao X., Mašek O., Zimmerman A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures // *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 256–257. P. 1–9. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2013.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.015).
47. Zhao X., Wang S., Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: Laboratory incubation and column leaching studies // *Journal of Soils and Sediments*. 2014. Vol. 14. No. 3. P. 471–482. DOI: [10.1007/s11368-013-0803-2](https://doi.org/10.1007/s11368-013-0803-2).

REFERENCES

1. Alferov A.A., *Assotsiativnyi azot, urozhai i ustoichivost' agro-ekosistemy* (Associative nitrogen, yield, and agroecosystem sustainability), Moscow: Russian Academy of Sciences, 2020, 184 p., DOI: [10.25680/VNIIA.2019.21.92.152](https://doi.org/10.25680/VNIIA.2019.21.92.152).
2. Balashov E.V., Rizhiya E.Ya., Vliyanie biouglya na plotnost' slozheniya i vodouderzhivayushchuyu sposobnost' supeschanoi dernovo-podzolstoi pochvy raznoi stepeni okult'rennosti (Effect of biochar on bulk density and water retention capacity of loamy sand spodosol of different fertility levels), *Agrofizika*, 2020, No. 2, pp. 1–9, DOI: [10.25695/AGRPH.2020.02.01](https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.02.01).
3. Gvozdet'skii N.A., *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Tyumen-skoj oblasti* (Physical and geographical zoning of the Tyumen Region), Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1973, 246 p.
4. Kapitonova O.A., Aksarina K.Yu., O nekotorykh fiziko-khimicheskikh svoistvakh pochv peschanykh obnazhenii severnykh raionov Zapadnoi Sibiri (On some physical and chemical properties of soils of sandy outcrops of the West Siberian northern regions), *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'nye izmeneniya klimata*, 2019, Vol. 10, No. 1, pp. 28–38, DOI: [10.17816/edgcc10533](https://doi.org/10.17816/edgcc10533).
5. Litvinovich A.V., Hammam A.A.M., Lavrishchev A.V., Pavlova O.Yu., Meliorativnye svoistva i udobritel'naya tsennost' razlichnykh po razmeru fraktsii biouglya (po dannym laboratornykh eksperimentov) (The reclamation of fertilizing properties and sites of different size fractions of biochar (according to laboratory experiments)), *Agrokhimiya*, 2016, No. 9, pp. 46–53.

6. Novokhatin V.V., Bioklimaticheskie resursy Severnogo Zaural'ya (Bioclimatic resources of the Northern Trans-Urals), *Agrarnyi vestnik Urala*, 2015, No. 8 (138), pp. 22–28.
7. Adeodun S.A., Sangodoyin A.Y., Ogundiran M.B., Optimisation of biochar yield from sorted wood wastes as sustainable alternatives to burning to ash, *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2022, Vol. 29, No. 1, pp. 15–26, DOI: [10.2478/eces-2022-0003](https://doi.org/10.2478/eces-2022-0003).
8. Agbede T.M., Oyewumi A., Benefits of biochar, poultry manure and biochar–poultry manure for improvement of soil properties and sweet potato productivity in degraded tropical agricultural soils, *Resources, Environment and Sustainability*, 2022., Vol. 7, 100051, DOI: [10.1016/j.resenv.2022.100051](https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100051).
9. Ahmadou A., Napoli A., Durand N., Montet D., High physical properties of cashew nut shell biochars in the adsorption of mycotoxins, *International Journal of Food Research*, 2019, Vol. 6, pp. 18–28, DOI: [10.2478/eces-2022-0003](https://doi.org/10.2478/eces-2022-0003).
10. Amin A.E.E.A.Z., Bagasse pith-vinasse biochar effects on carbon emission and nutrient release in calcareous sandy soil, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, Vol. 20, No. 1, pp. 220–231, DOI: [10.1007/s42729-019-00125-9](https://doi.org/10.1007/s42729-019-00125-9).
11. Baiamonte G., De Pasquale C., Marsala V., Cimò G., Alonzo G., Crescimanno G., Conte P., Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments, *Journal of Soils and Sediments*, 2015, Vol. 15, No. 4, pp. 816–824, DOI: [10.1007/s11368-014-0960-y](https://doi.org/10.1007/s11368-014-0960-y).
12. Beusch C., Biochar as a soil ameliorant: how biochar properties benefit soil fertility - a review, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2021, Vol. 09, No. 10, pp. 28–46, DOI: [10.4236/gep.2021.910003](https://doi.org/10.4236/gep.2021.910003).
13. Cantrell K.B., Hunt P.G., Uchimiya M., Novak J.M., Ro K.S., Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar, *Bioresource Technology*, 2012, Vol. 107, pp. 419–428, DOI: [10.1016/j.biortech.2011.11.084](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084).
14. Cornelissen G., Jubaedah, Nurida N.L., Hale S.E., Martinsen V., Silvani L., Mulder J., Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 634, No. 0806, pp. 561–568, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.380](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.380).
15. Dubrovina I.A., Effects of biochar on the agrochemical indicators and enzyme activity of soils in the middle taiga of Karelia, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 12, pp. 1957–1966, DOI: [10.1134/S106422932112005X](https://doi.org/10.1134/S106422932112005X).
16. Gabhane J.W., Bhange V.P., Patil P.D., Bankar S.T., Kumar S., Recent trends in biochar production methods and its application as a soil health

conditioner: a review, *SN Applied Sciences*, 2020, Vol. 2, No. 7, pp. 1–21, DOI: [10.1007/s42452-020-3121-5](https://doi.org/10.1007/s42452-020-3121-5).

17. Geng N., Kang X., Yan X., Yin N., Wang H., Pan H., Yang Q., Lou Y., Zhuge Y., Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, Vol. 232, p. 113241, DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.113241](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113241).

18. Graber E.R., Harel Y.M., Kolton M., Cytryn E., Silber A., David D.R., Tsechansky L., Borenshtein M., Elad Y., Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media, *Plant and Soil*, 2010, Vol. 337, No. 1, pp. 481–496, DOI: [10.1007/s11104-010-0544-6](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0544-6).

19. Griffin D.E., Wang D., Parikh S.J., Scow K.M., Short-lived effects of walnut shell biochar on soils and crop yields in a long-term field experiment, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, Vol. 236, pp. 21–29, DOI: [10.1016/j.agee.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.002).

20. He L., Liu Y., Zhao J., Bi Y., Zhao X., Wang S., Xing G., Comparison of straw-biochar-mediated changes in nitrification and ammonia oxidizers in agricultural oxisols and cambosols, *Biology and Fertility of Soils*, 2016, Vol. 52, No. 2, pp. 137–149, DOI: [10.1007/s00374-015-1059-3](https://doi.org/10.1007/s00374-015-1059-3).

21. Igalavithana A.D., Choi S.W., Shang J., Hanif A., Dissanayake P.D., Tsang D.C.W., Kwon J.H., Lee K.B., Ok Y.S., Carbon dioxide capture in biochar produced from pine sawdust and paper mill sludge: Effect of porous structure and surface chemistry, *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 739, p. 139845, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.139845](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139845).

22. Igaz D., Šimanský V., Horák J., Kondrlová E., Domanová J., Rodný M., Buchkina N.P., Can a single dose of biochar affect selected soil physical and chemical characteristics? *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018, Vol. 66, No. 4, pp. 421–428, DOI: [10.2478/johh-2018-0034](https://doi.org/10.2478/johh-2018-0034).

23. Jabborova D., Ma H., Bellingrath-Kimura S.D., Wirth S., Impacts of biochar on basil (*Ocimum basilicum*) growth, root morphological traits, plant biochemical and physiological properties and soil enzymatic activities, *Scientia Horticulturae*, 2021, Vol. 290, p. 110518, DOI: [10.1016/j.scienta.2021.110518](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110518).

24. Jones D.L., Rousk J., Edwards-Jones G., DeLuca T.H., Murphy D.V., Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three-year field trial, *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, Vol. 45, pp. 113–124, DOI: [10.1016/j.soilbio.2011.10.012](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.012).

25. Joseph S., Cowie A.L., Van Zwieten L., Bolan N., Budai A., Buss W., Cayuela M.L., Graber E.R., Ippolito J.A., Kuzyakov Y., Luo Y., Ok Y.S., Palansooriya K.N., Shepherd J., Stephens S., Weng Z., Lehmann J., How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil

- and plant responses to biochar, *GCB Bioenergy*, 2021, Vol. 13, No. 11, pp. 1731–1764, DOI: [10.1111/gcbb.12885](https://doi.org/10.1111/gcbb.12885).
26. Juriga M., Aydlm E., Horák J., Chlupík J., Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Balashov E.V., Šimanský V., The importance of initial application and reapplication of biochar in the context of soil structure improvement, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2021, Vol. 69, No. 1, pp. 87–97, DOI: [10.2478/johh-2020-0044](https://doi.org/10.2478/johh-2020-0044).
27. Juriga M., Šimanský V., Effects of biochar and its reapplication on soil pH and sorption properties of silt loam haplic Luvisol, *Acta Horticulturae et Regioteecturae*, 2019, Vol. 22, No. 2, pp. 65–70, DOI: [10.2478/ahr-2019-0012](https://doi.org/10.2478/ahr-2019-0012).
28. Kapitonova O.A., Aksarina K.Y., Yu A.K., On some physical and chemical properties of soils of sandy outcrops of the West Siberian northern regions, *Environmental dynamics and global climate change*, 2019, Vol. 10, No. 1, pp. 28–37, DOI: [10.17816/edgcc10533](https://doi.org/10.17816/edgcc10533).
29. Kumar A., Bhattacharya T., Mukherjee S., Sarkar B., A perspective on biochar for repairing damages in the soil–plant system caused by climate change-driven extreme weather events, *Biochar*, 2022, Vol. 4, No. 1, pp. 1–23, DOI: [10.1007/s42773-022-00148-z](https://doi.org/10.1007/s42773-022-00148-z).
30. Lehmann J., Rillig M. C., Thies J., Masiello C. A., Hockaday W. C., Crowley D., Biochar effects on soil biota – A review, *Soil biology and biochemistry*, 2011, Vol. 43, No. 9, pp. 1812–1836, DOI: [10.1016/j.soilbio.2011.04.022](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022).
31. Leng L., Huang H., Li H., Li J., Zhou W., Biochar stability assessment methods: A review, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 647, pp. 210–222, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.07.402](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402).
32. Meschewski E., Holm N., Sharma B.K., Spokas K., Minalt N., Kelly J.J., Pyrolysis biochar has negligible effects on soil greenhouse gas production, microbial communities, plant germination, and initial seedling growth, *Chemosphere*, 2019, Vol. 228, pp. 565–576, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2019.04.031](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.031).
33. Mohan D., Abhishek K., Sarswat A., Patel M., Singh P., Pittman C.U., Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration—a sustainable solution to crop-residue burning in India, *RSC Advances*, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 508–520, DOI: [10.1039/c7ra10353k](https://doi.org/10.1039/c7ra10353k).
34. Novak J.M., Busscher W.J., Watts D.W., Laird D.A., Ahmedna M.A., Niandou M.A.S., Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandiodult, *Geoderma*, 2010, Vol. 154, No. 3–4, pp. 281–288, DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.10.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.014).
35. Raza S., Zamanian K., Ullah S., Kuzyakov Y., Virto I., Zhou J., Inorganic carbon losses by soil acidification jeopardize global efforts on carbon

- sequestration and climate change mitigation, *Journal of Cleaner Production*, 2021, Vol. 315, p. 128036, DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.128036](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128036).
36. Ren X., Yuan X., Sun H., Dynamic changes in atrazine and phenanthrene sorption behaviors during the aging of biochar in soils, *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, Vol. 25, No. 1, pp. 81–90, DOI: [10.1007/s11356-016-8101-3](https://doi.org/10.1007/s11356-016-8101-3).
37. Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Belinets A.S., Balashov E.V., Effect of biochar on the properties of loamy sand Spodosol soil samples with different fertility levels: A laboratory experiment, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 2, pp. 192–200, DOI: [10.1134/S1064229314120084](https://doi.org/10.1134/S1064229314120084).
38. Sarauer J.L., Page-Dumroese D.S., Coleman M.D., Soil greenhouse gas, carbon content, and tree growth response to biochar amendment in western United States forests, *GCB Bioenergy*, 2019, Vol. 11, No. 5, pp. 660–671, DOI: [10.1111/gcbb.12595](https://doi.org/10.1111/gcbb.12595).
39. Sun Y., Lyu H., Cheng Z., Wang Y., Tang J., Insight into the mechanisms of ball-milled biochar addition on soil tetracycline degradation enhancement: Physicochemical properties and microbial community structure, *Chemosphere*, 2022, Vol. 291, p. 132691, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.132691](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132691).
40. Tabakaev R., Ibraeva K., Astafev A., Dubinin Y., Yazykov N., Zavorin A., Yakovlev V., Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis, *Fuel*, 2019, Vol. 245, pp. 29–38, DOI: [10.1016/j.fuel.2019.02.049](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.049).
41. Tangmankongworakoon N., An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose, *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 37–44, DOI: [10.1007/s40093-019-0267-5](https://doi.org/10.1007/s40093-019-0267-5).
42. Wang Y., Yin R., Liu R., Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, Vol. 110, No. 1, pp. 375–381, DOI: [10.1016/j.jaap.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.10.006).
43. Wardle D.A., Nilsson M.C., Zackrisson O., Fire-derived charcoal causes loss of forest humus, *Science*, 2008, Vol. 320, No. 5876, p. 629, DOI: [10.1126/science.1154960](https://doi.org/10.1126/science.1154960).
44. Yao Y., Gao B., Zhang M., Inyang M., Zimmerman A.R., Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil, *Chemosphere*, 2012, Vol. 89, No. 11, pp. 1467–1471, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2012.06.002](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002).
45. Zhang D., Yan M., Niu Y., Liu X., van Zwieten L., Chen D., Bian R., Cheng K., Li L., Joseph S., Zheng J., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Filley T.R., Pan G., Is current biochar research addressing global soil constraints for

sustainable agriculture?, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, Vol. 226, pp. 25–32, DOI: [10.1016/j.agee.2016.04.010](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.010).

46. Zhao L., Cao X., Mašek O., Zimmerman A., Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures, *Journal of Hazardous Materials*, 2013, Vol. 256–257, pp. 1–9, DOI: [10.1016/j.jhazmat.2013.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.015).

47. Zhao X., Wang S., Xing G., Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: Laboratory incubation and column leaching studies, *Journal of Soils and Sediments*, 2014, Vol. 14, No. 3, pp. 471–482, DOI: [10.1007/s11368-013-0803-2](https://doi.org/10.1007/s11368-013-0803-2).

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 113

Главный редактор *А.Л. Иванов*

Заместитель главного редактора *И.Ю. Савин*

Редактор, компьютерная верстка *А.Ю. Романовская*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Почвенный институт имени В.В. Докучаева
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
<https://bulletin.esoil.ru>
e-mail: bulletin@esoil.ru

Сдано в набор 30.12.2022 г.
Подписано в печать 30.12.2022 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8 Тираж 75 экз. Заказ №

Цена договорная.

Отпечатано с готового макета по заказу
Почвенного института имени В.В. Докучаева
ИП Ерховой И.М. (ОГРНИП 319774600080241)
Тел. (495) 799-48-85
e-mail: apr-rpa@list.ru