

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА

имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 105

Москва
2020

<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 105

**Moscow
2020**

<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

Научный редактор выпуска:
Козлов Д. Н., канд. геогр. наук

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

Science editor of the volume:
Kozlov D. N., PhD in Geogr. Sci.

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 (Stellenbosch 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)

СОДЕРЖАНИЕ

Статьи

Возможность применения карт элементарных геохимических ландшафтов для картографирования содержания тяжелых металлов и металлоидов в городских почвах

Энтин А.Л., Тимофеев И.В. 5

Топографические условия дренируемости почвенного покрова Владимирского Ополья

Шилов П.М. 28

Картирование границ почвенных горизонтов методом георадиолокации

Рязанцев П.А. 57

Баланс элементов в системе “агрокернозем глинисто-иллювиальный – сельскохозяйственные растения” на Плавском плато (Тульская область России)

Шопина О.В., Семенов И.Н.,

Парамонова Т.А., Комиссарова О.Л. 91

Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды

Петров Д.Г. 109

Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв

Грубина П.Г., Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю. 146

Расчетная реконструкция профильного распределения минералов по содержанию стабильного компонента на примере солонца коркового светлого сухостепной зоны юга России

Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Каганова А.Е. 173

Научные рецензии

Роль биоты в создании почвенного профиля и функционировании почвы: новые материалы и интерпретация известных фактов и существующих концепций

Соколова Т.А. 208

CONTENTS

Scientific articles

Possible application of elementary geochemical landscapes map for mapping heavy metals and metalloids content in urban soils <i>Entin A.L., Timofeev I.V.</i>	5
Topographic conditions of soil drainage of Vladimir Opolie <i>Shilov P.M.</i>	28
Mapping the boundaries of soil horizons using ground-penetrating radar <i>Ryazantsev P.A.</i>	57
The balance of elements in the system “Luvic Chernozems – agricultural plants” on the Plavsk upland (Tula region of Russia) <i>Shopina O.V., Semenov I.N., Paramonova T.A., Komissarova O.L.</i>	91
The paths of migration of charcoal particles in the post-pyrogenic soils of the taiga and tundra depending on features of fire and environmental factors <i>Petrov D.G.</i>	109
The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility <i>Grubina P.G., Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu.</i>	146
Predicted reconstruction of the profile distribution of minerals according to the content of the stable component in the crust light solonetz of dry-steppe zone in the south of Russia <i>Varlamov E.B., Churilin N.A., Kaganova A.E.</i>	173

Reviews

The role of biota in soil profile formation and soil functioning: new materials and interpretation of well-known facts and existing concepts <i>Sokolova T.A.</i>	208
--	-----

СТАТЬИ

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-5-27



Ссылки для цитирования:

Энтин А.Л., Тимофеев И.В. Возможность применения карт элементарных геохимических ландшафтов для картографирования содержания тяжелых металлов и металлоидов в городских почвах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 5-27. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-5-27

Cite this article as:

Entin A.L., Timofeev I.V., Possible application of elementary geochemical landscapes map for mapping heavy metals and metalloids content in urban soils, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 5-27, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-5-27

Благодарность:

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00079\18.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of the scientific project No. 18-35-00079\18.

**¹Возможность применения карт элементарных
геохимических ландшафтов для
картографирования содержания тяжелых
металлов и металлоидов в городских почвах**

© 2020 г. А. Л. Энтин*, И. В. Тимофеев**

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

* <http://orcid.org/0000-0002-0350-5587>, e-mail: agentin@geogr.msu.ru,
** <http://orcid.org/0000-0001-8817-1231>, e-mail: vano-timofeev@yandex.ru.

¹ Статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

*Поступила в редакцию 15.05.2020, после доработки 09.12.2020,
принята к публикации 17.12.2020*

Резюме: Картографирование содержания тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в почвах городских территорий необходимо при оценке рисков для здоровья населения. Из-за трудоемкости и дороговизны анализов шаг опробования обычно велик, по сравнению с характерными интервалами изменчивости свойств на городской территории. В настоящей работе предпринята попытка картографирования коэффициентов концентрации ТММ на базе карты элементарных геохимических ландшафтов (ЭЛ). Территория исследования – г. Дархан (Монголия) – крупный промышленный и транспортный узел. Для анализа на загрязнители: As, Cd, Cr, Cu, Pb, Sb, W, – было отобрано 126 проб почв, расстояние между точками опробования составляло 500–700 м. Для каждой точки были рассчитаны коэффициенты концентрации (EF) каждого из загрязнителей. Карта ЭЛ получена путем морфометрического анализа ЦМР SRTM (размер ячейки 30 м) с привлечением данных о положении объектов гидрографической сети. Итоговые карты коэффициентов концентрации построены методом площадной интерполяции, где в качестве исходных данных использовалась диаграмма Вороного из точек опробования, а в качестве целевых полигонов – контуры ЭЛ. Сравнение результата интерполяции с использованием контуров ЭЛ с результатами интерполяции по методам обратно-взвешенных расстояний (ОВР) и ординарного кригинга показывает, что интерполяция с использованием контуров ЭЛ позволяет получить более достоверный результат, что выражается более низким значением среднеквадратической ошибки. При этом некоторые особенности распределения показателя, полученного в результате интерполяции, скорее всего, возникают как артефакты интерполяции. Тем не менее, показана потенциальная пригодность карт ЭЛ в качестве основы для картографирования загрязнения городских территорий.

Ключевые слова: интерполяция, геостатистика, цифровые модели рельефа (ЦМР), геоморфометрия, Монголия, Дархан.

²Possible application of elementary geochemical landscapes map for mapping heavy metals and metalloids content in urban soils

A. L. Entin^{*}, I. V. Timofeev^{}**

Lomonosov Moscow State University,

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

^{*}<http://orcid.org/0000-0002-0350-5587>, e-mail: aentin@geogr.msu.ru,

^{**}<http://orcid.org/0000-0001-8817-1231>, e-mail: vano-timofeev@yandex.ru.

Received 15.05.2020, Revised 09.12.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: Mapping heavy metals and metalloids (HMM) content in urban soils is necessary for the public health risk assessment. The sampling step is usually large in comparison with typical variability intervals due to the complexity and expensiveness of analysis. This paper considers an attempt to map HMM concentration coefficients based on landscape-geochemical positions (LGP). The case study area is Darkhan, Mongolia, a large industrial and transport hub. 126 soil samples were taken for analysis of contaminants As, Cd, Cr, Cu, Pb, Sb, W; the distance between sampling points was 500–700 m. For each point, the concentration coefficient (DF) of each pollutant was calculated. The LGP map was derived from SRTM digital elevation model, with supplement of hydrographic network data. The final maps of the concentration coefficients were created using areal interpolation technique with the Voronoi diagram of sampling points as an input data and the LGP polygons as a target dataset. The relatively low sampling points density, as well as the relatively large DEM cell size limit the possibility to harmonize datasets. This leads to the noticeable difference between the parameter distribution obtained from areal interpolation and the distribution obtained from deterministic method. Besides, some resulting features should be considered as interpolation artifacts. Nevertheless, the potential suitability of LGP maps as a basis for mapping pollution of urban areas is shown.

Keywords: interpolation, geostatistics, digital elevation models (DEM), geomorphometry, Mongolia, Darkhan.

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

ВВЕДЕНИЕ

Город – сложная природно-антропогенная среда, ключевыми компонентами которой являются люди, промышленные объекты, селитебные кварталы, парки и разветвленная транспортная сеть. В результате деятельности человека помимо механической трансформации ландшафтов (выравнивание, искусственные холмы, бетонирование берегов рек) существенное влияние на здоровье людей оказывает химическое загрязнение тяжелыми металлами и металлоидами (ТММ), недоступное для глаза человека, но имеющее наиболее сильное негативное воздействие ([Сает и др., 1990](#); [Demetriades, Birke, 2015](#); [Mapping..., 2011](#)). Определение их содержания в почвах городских ландшафтов имеет большое значение с точки зрения оценки рисков для здоровья населения. Накопление ТММ в городской среде снижает качество воздуха, почв, а также угрожает здоровью при попадании в организм человека через кожу, пищеварительную систему или при вдыхании. При этом из-за сложности, трудоемкости и дороговизны анализ шаг опробования почв обычно составляет порядка 500–700 м или больше. Однако для оценки городской территории с точки зрения загрязнения ТММ необходимо иметь возможность выполнять детальное картографирование и районирование городской среды. Для достоверного картографирования и последующей оценки рисков необходимо интерполировать значения, полученные в точках опробования, с учетом факторов, влияющих на распределение элементов в почвах. К таким факторам относятся: локальные особенности циркуляции атмосферы, определяющие направление и интенсивность разноса загрязнений от источников; рельеф местности, влияние которого в значительной степени определяет латеральный перенос вещества, механический и литологический состав грунтов, определяющий возможность вертикальной миграции и накопления загрязнений. При этом учесть влияние рельефа сравнительно проще, чем учесть влияние других факторов, с одной стороны, благодаря доступности данных (в виде цифровых моделей рельефа, ЦМР), и, с другой стороны, в результате развития методов геоморфометрического анализа и цифрового почвенного картографирования ([Florinsky, 2016](#)). Привлечение сведений

о высотах местности в виде ЦМР потенциально может повысить детальность и достоверность моделирования загрязнения почв в условиях, когда отбор проб выполняется по относительно редкой сетке.

Цель данной работы – повышение достоверности картографирования ТММ в почвах с использованием морфометрических параметров, рассчитываемых по ЦМР. Для этого предлагается создавать на основе ЦМР карту элементарных геохимических ландшафтов (ЭЛ), а затем использовать полученные контуры в качестве вспомогательного набора данных для интерполяции показателей, характеризующих содержание ТММ в почвах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются почвы г. Дархана, третьего по величине города Монголии, административного центра аймака Дархан-Уул. Население г. Дархан, по данным статистической службы Монголии, превышает 86 тыс. человек ([Population..., 2020](#)). Город расположен в долине р. Хара (правый приток р. Орхон), в пределах крупной геоморфологической области – Центрально-Монгольской приподнятой равнины между Сибирской и Китайской платформами ([Геоморфология..., 1982](#)). Климат резкоконтинентальный со значительными годовыми и суточными колебаниями температуры воздуха ($t_{\text{январь}} = -18...-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{июль}} = +18...+20\text{ }^{\circ}\text{C}$), резкой сменой сезонов, значительной сухостью воздуха, малым количеством осадков (300–350 мм в год). В течение года преобладают ветры южного и северного направлений ([Мурзаев, 1952](#)).

Основным источником загрязняющих веществ в районе г. Дархан является промышленная зона к югу от городской застройки. Здесь располагаются, в частности, Дарханская ТЭЦ, работающая на буром угле, крупнейший в Монголии металлургический завод и некоторые другие производства. Другой источник, специфический для городов Монголии – юрточные кварталы, где широко применяется отопление углем при помощи небольших бытовых печек ([Kosheleva et al., 2019](#)). Загрязняющие вещества с выбросами поступают в атмосферу, а затем осаждаются и накапливаются в городских почвах.

Почвенно-геохимическая съемка территории проводилась летом 2011–2014 гг. Было отобрано 126 смешанных проб, включая три фоновые. Пробы отбирались из поверхностного горизонта (0–10 см) по нерегулярной сетке с шагом примерно 500–700 м ([Kosheleva et al., 2019](#); [Timofeev et al., 2019](#)). Схема размещения точек опробования показана на рисунке 1.

Валовое содержание ТММ в пробах почв и растительного материала анализировалось масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой в ВИМС. Для подробного анализа выбраны типичные для данной территории загрязнители: As, Cd, Cr, Cu, Pb, Sb, W ([Kosheleva et al., 2019](#)). При обработке полученных данных вычислялись коэффициенты концентрации $EF_i = C_u/C_b$, где C_u и C_b – концентрация элемента в городских и фоновых образцах.

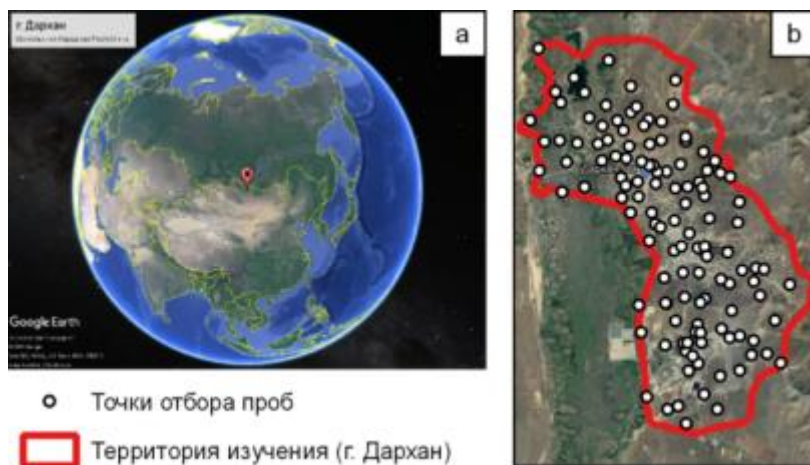


Рис. 1. Географическое положение г. Дархан (а) и размещение точек отбора проб на его территории (b).

Fig. 1. The location of Darkhan, Mongolia (a), and the distribution of soil samples over study area (b).

В настоящее время картографирование непрерывно изменяющихся свойств почв обычно выполняется с привлечением методов геостатистики ([Геостатистика..., 2007](#)). Для оценки возмож-

ности картографирования был выполнен геостатистический анализ значений коэффициентов концентрации ТММ в точках опробования и построены вариограммы показателей. Вариограммы приведены на рисунке 2. Видно, что для всех коэффициентов концентрации, за исключением C_g и C_u , характерны примерно одинаковые величины разности вне зависимости от расстояния. Такой вид – так называемый “чистый эффект самородка”, *pure nugget*, – имеют вариограммы данных, в которых отсутствует пространственная корреляция ([Демьянов, Савельева, 2010](#)).

Вариограмма типа *pure nugget* может быть получена, если данные в самом деле распределены абсолютно случайно. Это возможно по следующим причинам: грубые ошибки в измерении координат или определении показателя; мелкомасштабная вариабельность (характерные расстояния “плавной” изменчивости показателя меньше, чем расстояние между точками опробования), истинная случайность распределения. Наиболее вероятной причиной мы считаем именно мелкомасштабную вариабельность, поскольку из опыта исследований известно, что в распределении коэффициента концентрации должны наблюдаться какие-либо закономерности, а вероятность грубой ошибки ничтожна.

Отсутствие пространственной корреляции не позволяет использовать методы геостатистики для картографирования распределения ТММ. Более простые методы, основанные на детерминистической интерполяции (например, метод обратно-взвешенных расстояний), также исключаются. Возможным решением этой проблемы может стать использование независимой “сетки” пространственного деления, учитывающего факторы миграции ТММ в почвах. В качестве основы такого деления может быть использована карта элементарных геохимических ландшафтов (ЭЛ) уровня рода.

По набору и определенным соотношениям ведущих геохимических процессов Б.Б. Польшов ([1956](#)) различал элювиальные (автономные), супераквальные и субаквальные ландшафты. Эта классификация была дополнена М.А. Глазовской ([2002](#)) трансэлювиальными ландшафтами склонов, трансаккумулятивными нижних частей склонов, аккумулятивно-элювиальными замкнутых понижений на водораздельных поверхностях. Эти кате-

гории ЭЛ в классификации А.И. Перельмана соответствуют уровню рода ([Перельман, Касимов, 2000](#)).

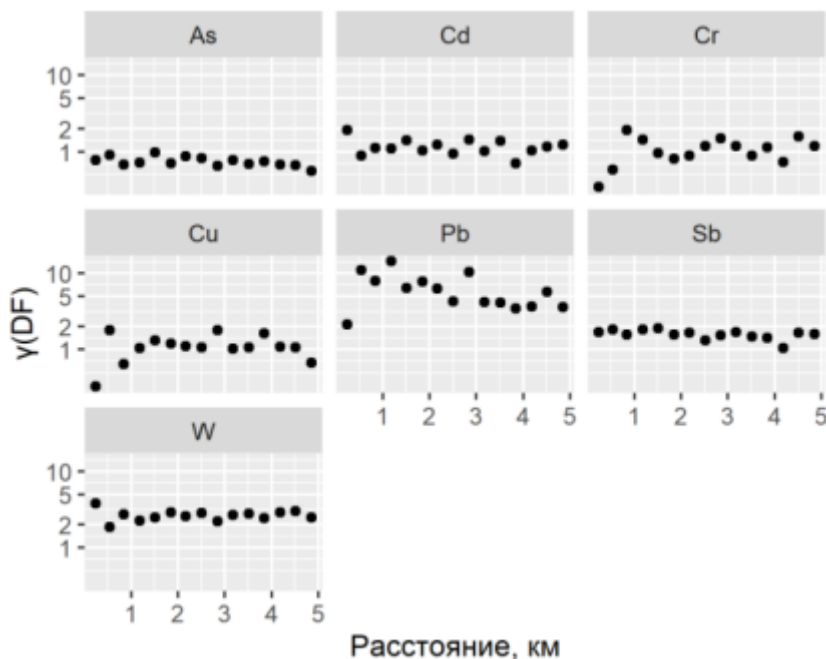


Рис. 2. Полувариограммы коэффициентов концентрации (DF) изучаемых ТММ.

Fig. 2. Semivariograms of DF concentration coefficients of considered HMMs.

Карты родов ЭЛ, как правило, составляются вручную на основе экспертных знаний и поэтому отличаются высокой степенью субъективности. Качество полученного результата напрямую зависит от личного опыта исследователя. Существуют единичные попытки использовать формальные критерии и геоинформационные подходы ([Богданова и др., 2012](#)). В настоящем исследовании мы используем автоматическое выделение ЭЛ уровня рода в соответствии с формальными критериями, приведенными в таблице 1 ([Тимофеев, Энтин, 2018](#)).

Таблица 1. Критерии выделения родов элементарных геохимических ландшафтов. Источник: (Гимофеев, Энтин, 2018)

Table 1. Criteria for mapping elementary geochemical landscapes. Source: (Timofeev, Entin, 2018)

Расположение контуров	Крутизна, °	Кривизна, м ⁻¹	Элементарный ландшафт (ЭЛ)	Индекс
Водораздел	<2	≈ 0, >0	Автономный первого порядка (плоские водораздельные поверхности)	A1
Между поймой и водоразделом	<2	Любое значение	Автономный второго порядка (надпойменная терраса, четко выраженная в рельефе)	A2
Водораздел	<4.5	<0	Автономный второго порядка (надпойменная терраса, четко выраженная в рельефе)	A2
Внутри поймы	2–4.5	>0	Трансэлювиальный со слабым выносом	ТЭ1
Между поймой и водоразделом	2–4.5	Любое значение	Трансэлювиальный со слабым выносом	ТЭ1
Водораздел	2–4.5	≈ 0, >0	Трансэлювиальный со слабым выносом	ТЭ1
Между поймой и водоразделом, граничит с ТЭ1	4.5–10	Любое значение	Трансэлювиальный с умеренным выносом	ТЭ2
Между поймой и водоразделом, граничит с ТЭ1 или ТЭ2	10–20	Любое значение	Трансэлювиальный с активным выносом	ТЭ3
Между поймой и водоразделом, граничит с ТЭ1, ТЭ2 или ТЭ3	> 20	Любое значение	Трансэлювиальный с интенсивным выносом	ТЭ4
Внутри поймы	2–4.5	<0, ≈ 0	Трансаккумулятивный	ТА
Внутри поймы	<2	–, 0, +	Супераккумулятивный	СА

Исходными данными для создания карты родов ЭЛ послужили цифровая модель рельефа (ЦМР) и векторные наборы данных об объектах гидрографической сети (р. Хара). В качестве ЦМР используется фрагмент глобального регулярно-сеточного

набора данных о высотах земной поверхности SRTM ([Farr et al., 2007](#)). Шаг регулярной сетки (размер ячейки) этого набора составляет 1", что примерно соответствует 30 м на местности. Фрагмент был трансформирован в систему координат UTM, а также подвергнут фильтрации по методу Sun et al. ([2007](#)). Затем была выполнена передискретизация набора данных на сетку более высокого разрешения (10 м) – такая операция необходима для упрощения векторизации раstra ЭЛ на заключительных этапах работы.

Набор пространственных данных об объектах гидрографической сети был создан путем визуального дешифрирования мозаик космических снимков сверхвысокого разрешения, полученных с космических аппаратов WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3 и доступных в виде покрытия в сервисе Google Earth. Дешифрирование выполнено при помощи инструментария Google Earth, полученный набор содержал контуры объектов гидрографической сети полилинейной геометрии без дополнительной атрибутивной информации.

На основе ЦМР были рассчитаны растры крутизны и кривизны склонов. Расчет проводился в SAGA ([Conrad et al., 2015](#)). Полученные значения были переклассифицированы в соответствии с таблицей 1. Следует заметить, что значение кривизны, рассчитанное по ЦМР, практически никогда не может быть строго равно 0 из-за особенностей машинных вычислений, а также вследствие наличия шума и артефактов интерполяции в исходных данных. Поэтому для отделения значений кривизны было выбрано пороговое значение, равное по модулю 0.0005 м^{-1} . Значения, меньшие по модулю, чем указанная пороговая величина, были приняты как приблизительно равные 0.

Границы поймы определялись путем выделения зоны подтопления по разности высот ячеек, соответствующих положению водотока, и прилегающих территорий. Разность высот была рассчитана в SAGA (инструмент *Vertical Distance to Channel Network*). Ячейки ЦМР, для которых эта разность оказалась ниже 2 м (известный по данным полевого обследования уровень подъема воды в р. Хара), маркированы как относящиеся к пойме. Для определения положений водоразделов была рассчитана общая водосборная площадь. Расчет выполнен в SAGA на основе алгорит-

ма Multiple Flow Direction. Ячейки с низкими значениями водосборной площади помечались как потенциально относящиеся к водораздельным пространствам. Однако низкие значения водосборной площади, рассчитанной по ЦМР, характерны не только для водораздельных пространств, но и, вследствие особенностей процедуры расчета, к положительным формам рельефа в пойме реки. Поэтому в качестве дополнительного критерия использовалось максимальное значение крутизны склона в радиусе 5 ячеек ЦМР. Обычные значения крутизны склона для поймы не превышают 5° , поэтому ячейки, максимальная крутизна в окрестности которых превышала 5° , интерпретированы и промаркированы как водораздельные, для остальных ячеек эта маркировка снята. Полученные результаты положения пойм и водоразделов объединены в тематический слой с выделением трех классов: “пойма”, “промежуточное”, “водораздел”.

Для создания карты ЭЛ был выполнен оверлей четырех указанных выше классифицированных слоев. В результате был получен растр, отражающий уникальные комбинации возможных классов. Некоторые уникальные комбинации соответствуют одному и тому же роду ЭЛ: например, комбинации классов “внутри поймы” и крутизны менее 2° соответствуют супераквальным ландшафтам (СА) при любых возможных значениях кривизны. Поэтому результат оверлея был повторно переклассифицирован в соответствии с таблицей 1. После этого растр родов ЭЛ был конвертирован в векторный набор данных. На заключительном шаге полученный векторный набор был генерализован при помощи инструмента присоединения полигонов небольшой площади (порядка площади 1–2 ячеек исходного растра) к более крупным соседним контурам. Вся вышеописанная процедура проиллюстрирована на рисунке 3.

Для картографирования значений коэффициента концентрации использовалась площадная интерполяция (areal interpolation) по принципу “полигон-к-полигону” ([Krivoruchko et al., 2011](#)).

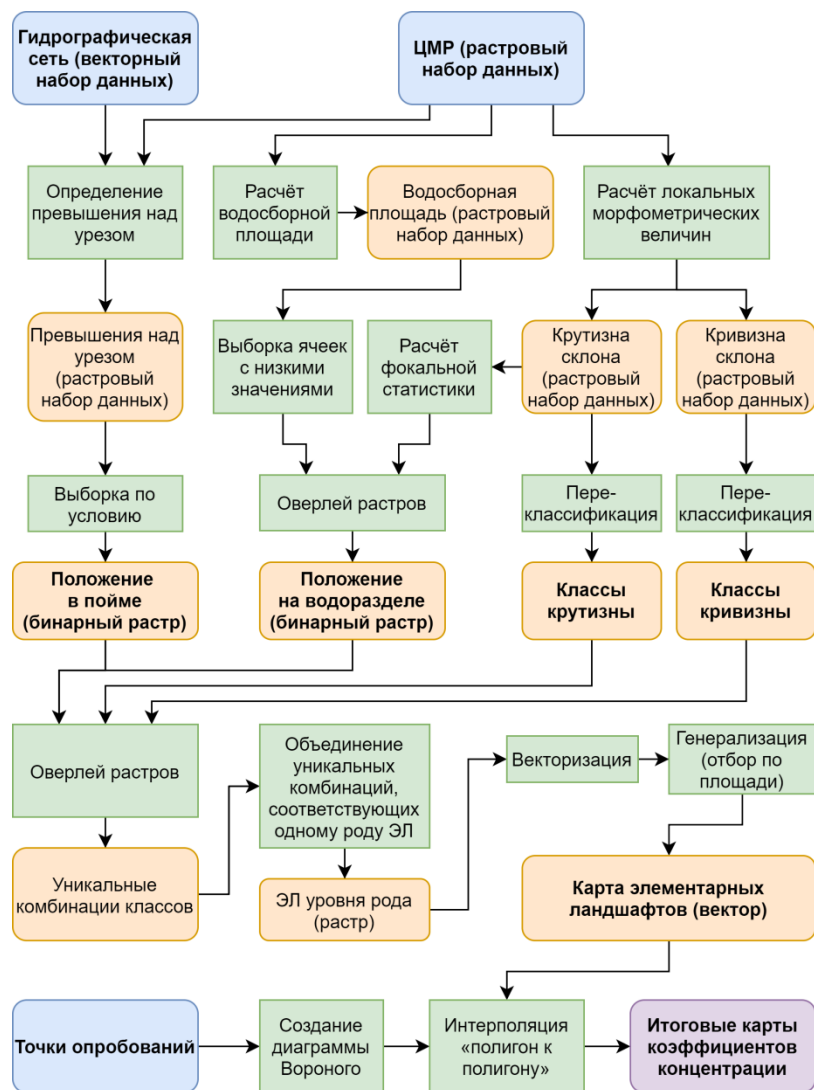


Рис. 3. Методика построения карты родов элементарных геохимических ландшафтов (ЭЛ) и получения карт коэффициентов концентрации на ее основе.

Fig. 3. Map of elementary geochemical landscapes (genera) and map of concentration coefficients derivation methodic.

Этот метод обычно применяется в исследованиях социально-экономической тематики для передискретизации с одной сетки деления на другую, при условии, что границы выделов не согласованы друг с другом.

В настоящей работе в качестве исходных полигонов использовались полигоны Тиссена (диаграмма Вороного), построенные по точкам опробований; целевыми полигонами являлись контуры родов ЭЛ, рассчитанных на основе ЦММ.

Оценка результата интерполяции выполнена методом кросс-валидации. Суть этого метода состоит в том, что из исходного набора данных изымается одна точка, и интерполяция выполняется без ее учета. Затем значение, полученное для данной точки в результате интерполяции, сравнивается с исходным значением.

Процедура повторяется для каждой точки в исходном наборе ([Демьянов, Савельева, 2010](#)). При этом характеристики ошибок результатов интерполяции должны быть не хуже, чем аналогичные показатели для результатов интерполяции традиционными методами (например, ОВР или обычного кригинга) – которые, как было указано выше, заведомо непригодны для имеющегося набора данных. Поэтому одновременно с интерполяцией по предложенной методике была выполнена интерполяция традиционными методами и оценка этих результатов методом кросс-валидации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 4 показана карта элементарных ландшафтов (ЭЛ), построенная на основе ЦМР. Видно, что контуры различных элементарных ландшафтов распределены по территории неравномерно. Супераквальные ландшафты (СА) образуют один непрерывный контур вокруг русла р. Хара. К нему примыкает несколько крупных контуров трансаккумулятивных ландшафтов (ТА). Автономные ландшафты (А1, А2) занимают небольшие площади вблизи водоразделов и не образуют связных, протяженных контуров. Также обращает на себя внимание относительно случайное чередование ТА и ТЭ1: небольшие по площади контуры одного из типов находятся внутри более крупного контура другого типа; граница между крупными контурами также довольно извилистая. Причина появления такой “мозаичной” картины состоит, вероят-

нее всего, в сохранении на используемой ЦМР локальных особенностей поля высот, соответствующих формам рельефа разного размера и масштабного уровня.

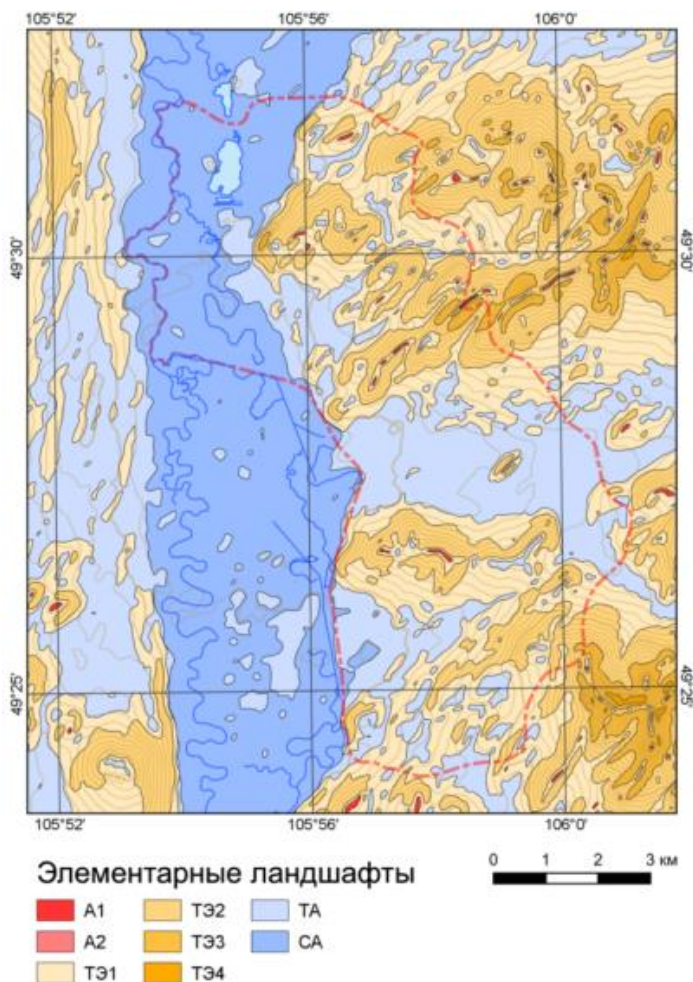


Рис. 4. Карта элементарных геохимических ландшафтов (ЭЛ) уровня рода. Объяснения индексов приведены в таблице 1.

Fig. 4. Map of elementary geochemical landscapes (genera). See index explanations in table 1.

В практике общегеографического картографирования такие особенности, как правило, удаляются путем генерализации, однако в настоящем исследовании к SRTM не применялось никаких специальных процедур генерализации, за исключением фильтрации, описанной выше.

Следует также отметить, что для интерполяции по методу “полигон к полигону” желательно, чтобы контуры, на которые осуществляется дискретизация, имели относительно небольшую площадь. В процессе интерполяции выполняется осреднение показателя по всей площади контура, что может искажать картину распределения показателя для достаточно крупных площадей. В полученном наборе данных это относится к ландшафтам СА, ТА и, в меньшей степени, к ТЭ1.

В результате применения описанной методики был получен векторный полигональный набор пространственных данных, представляющий коэффициенты концентрации (ЕF) ТММ на изучаемой территории. Карты коэффициента концентрации (ЕF) изучаемых ТММ представлены на рисунке 5.

Видно, что, как и ожидалось, наиболее высокие концентрации загрязнителей наблюдаются в южной части изучаемой территории, ближе к основным источникам загрязнителей. Абсолютные значения полученных коэффициентов варьируют в разных пределах: наиболее высокие значения (более 5) наблюдаются для Cr, Cu и W, в то время как обычные значения для Cd и Pb варьируют от 1 до 2. В остальном же наблюдаемые различия показателей связаны, с различными источниками. As и Sr имеют достаточно однородное распределение со слабовыраженной аккумуляцией к северу от Дарханской ТЭЦ на склоне отрога хребта, отделяющего промышленную зону от селитебной. Cu, Sb, Cd имеют значительно более дифференцированное распределение. Кроме аномалии вблизи ТЭЦ, зоны аккумуляции сформировались в юрочных кварталах в северной части города. Сравнение карт As, Cr, Cu, Sb и Cd позволяет сделать вывод о том, что источником этих элементов являются выбросы золы при сжигании угля. Промышленное высокотемпературное сжигание высвобождает более широкий перечень загрязнителей, нежели низкотемпературное в юртах. В

селитебной зоне с многоэтажной застройкой в центре города и в юрточном квартале на севере обнаружены высококонтрастные аномалии Pb вблизи дорог. Их основным источником являются продукты эксплуатации автотранспорта и в особенности этилированный бензин. Полученные данные подтверждают результаты ранее проведенных исследований ([Kosheleva et al., 2019](#)).

Оценка результатов интерполяции показателей, на основе которых были построены карты, представленные на рисунке 5, выполнялась методом кросс-валидации.

В таблице 2 приведены среднеквадратические ошибки (RMSE), рассчитанные для каждого EFi TMM на основе методики интерполяции, описанной в настоящей работе. Для сравнения приводятся среднеквадратические ошибки, полученные для интерполяции того же набора данных детерминистическим методом (интерполяцией по методу обратных взвешенных расстояний, OBR) и методом ординарного кригинга.

Для элементов Cd, Cu и Pb применение предлагаемой методики интерполяции позволяет несколько уменьшить значение ошибки, по сравнению с альтернативными подходами.

В одном случае (Sb) разница между рассчитанными значениями ошибок незначительна. Еще в одном случае (Cr) среднеквадратическая ошибка интерполяции, выполненной предлагаемым методом, оказалась хуже ошибки детерминистической интерполяции, но лучше ошибки интерполяции методом ординарного кригинга. Наконец, результат интерполяции As по формальным критериям уступает всем альтернативным подходам. Приведенные значения, на наш взгляд, не могут служить убедительным доказательством преимущества интерполяции с использованием данных о рельефе, но свидетельствуют об определенном потенциале такого подхода применительно к картографированию содержания ТММ.

Итак, применение карты ЭЛ в качестве основы для картографирования содержания ТММ в почве позволяет получить более детальное распределение, чем использование альтернативных подходов, однако достоверность получаемого результата требует отдельной оценки.

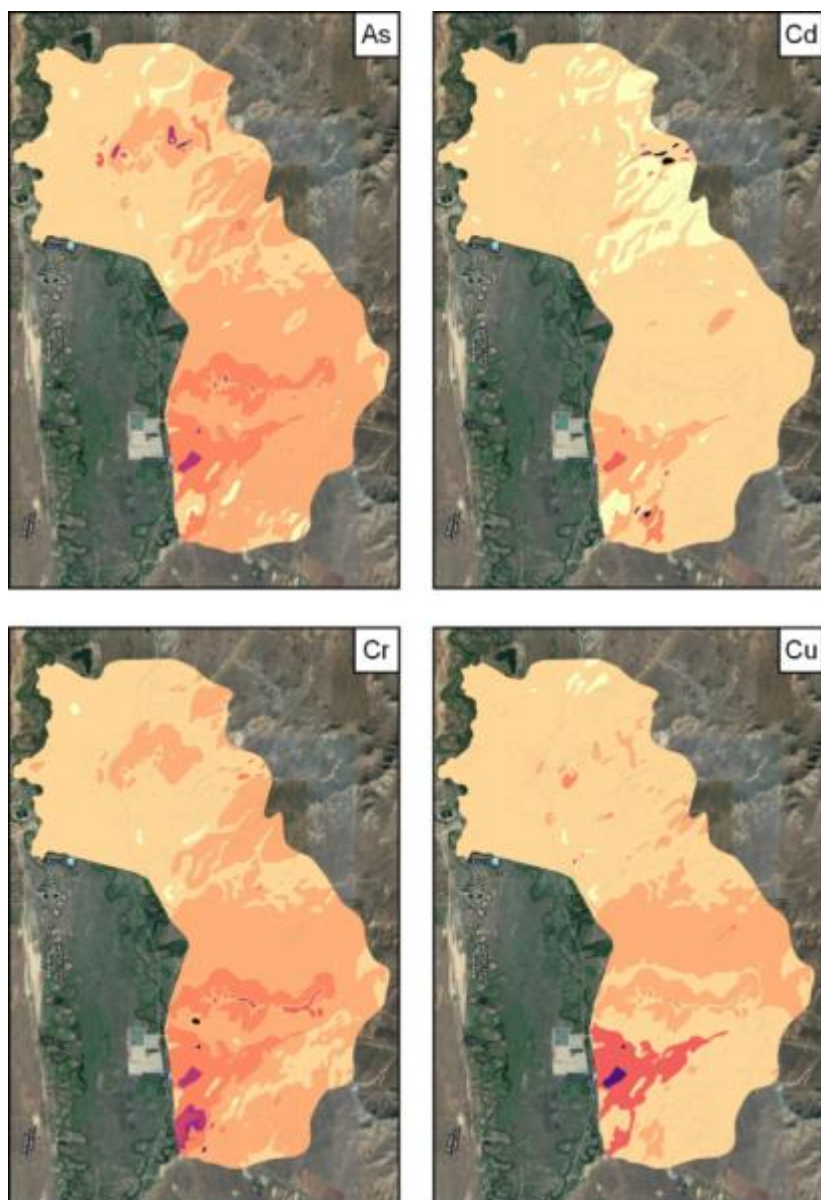


Рис. 5. Карты коэффициентов концентрации ТММ.

Fig. 5. Maps of HMM concentration coefficients.

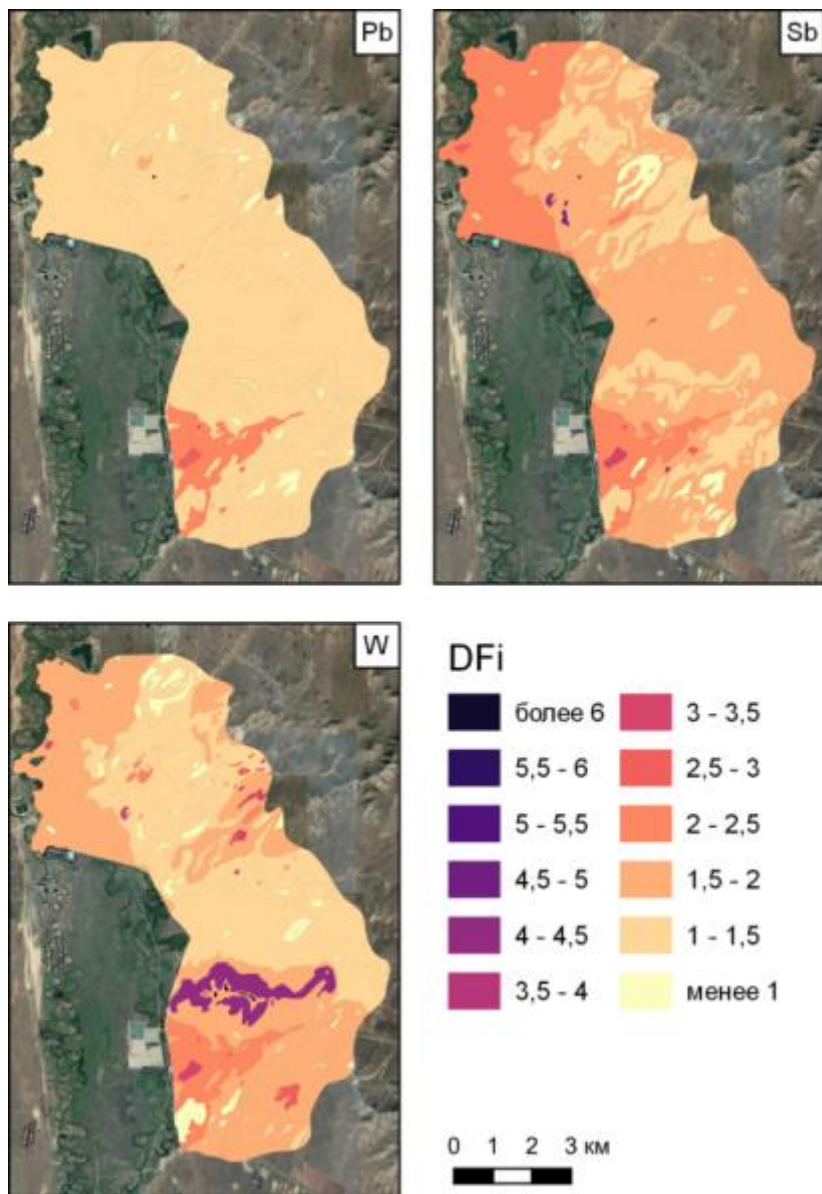


Рис. 5 (продолжение). Карты коэффициентов концентрации ТММ.
Fig. 5 (continuation). Maps of HMM concentration coefficients.

Таблица 2. Среднеквадратические ошибки (RMSE) интерполированных значений коэффициентов концентрации. Полужирным начертанием выделены лучшие значения для каждого ТММ

Table 2. Root mean square errors (RMSE) of interpolated concentration coefficients values. Best value for each HMM is highlighted

ТММ	Предложенный метод	ОВР	Ординарный кригинг
As	1.00	0.91	0.88
Cd	1.12	1.33	1.15
Cr	1.13	1.07	1.19
Cu	1.09	1.19	1.15
Pb	2.53	2.61	2.76
Sb	1.32	1.33	1.31
W	1.77	1.78	1.71

В частности, процедура получения карты ЭЛ на основе ЦМР оставляет возможность для совершенствования за счет применения процедур генерализации и более дробного деления крупных контуров. Для более точной оценки необходимо выполнение пробоотбора на содержание ТММ с шагом меньшим, чем используемый в настоящем исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предпринята попытка составления карты содержания тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в верхнем горизонте почв городской территории для г. Дархан, Монголия. Относительно крупный шаг опробования обусловил случайность распределения показателя коэффициентов концентрации в пространстве, что исключило возможность применения традиционных геостатистических методов. Для картографирования на основе ЦМР SRTM была создана карта родов элементарных геохимических ландшафтов (ЭЛ), контуры которой использовались для экстраполяции значений коэффициентов концентрации ТММ на территорию изу-

чения. Продемонстрирована потенциальная пригодность описанного подхода, однако особенности используемых данных (в частности, SRTM и контуров ЭЛ) не позволили получить полностью достоверный результат для выбранной детальности картографирования.

Для повышения достоверности картографирования свойств городских почв наиболее желательно уменьшение шага опробования, однако в условиях трудоемкости и дороговизны анализов можно рассчитывать на совершенствование методики выделения ЭЛ по ЦМР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И. Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 2012. №. 1. С. 23–28.
2. Геоморфология Монгольской Народной Республики. М.: Недра, 1982. 256 с.
3. Геостатистика и география почв / отв. ред. П.В. Красильников. Ин-т биологии КарНЦ РАН. М.: Наука, 2007. 175 с.
4. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
5. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика / под ред. Р.В. Арутюняна. М.: Наука, 2010. 327 с.
6. Мурзаев Э.М. Монгольская Народная Республика: Физико-географическое описание. М.: Географгиз, 1952. 472 с.
7. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов. М.: Астерия-2000, 2000. 610 с.
8. Полынов Б.Б. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.
9. Сагт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
10. Тимофеев И.В., Энтин А.Л. Построение карты родов элементарных ландшафтов на основе цифровой модели рельефа для территории г. Дархан (Монголия) // Материалы XIII международного симпозиума Проблемы экоинформатики, 2018. С. 171–175.
11. Demetriades A., Birke M. Urban Geochemical Mapping Manual: Sampling, Sample preparation, Laboratory analysis, Quality control check, Statistical processing and Map plotting. Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p.

12. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8. Iss. 7. P. 1991–2007. DOI: [10.5194/gmd-8-1991-2015](https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015).
13. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. 2007. Vol. 45. No. 2. P. RG2004. DOI: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183).
14. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.
15. Mapping the chemical environment of urban areas / Johnson C.C., Demetriades A., Locutura J., Ottesen R.T. (Eds). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 616 p.
16. Kosheleva N.E., Timofeev I.V., Kasimov N.S., Sandag E.A. Geochemical transformation of soil cover and woody vegetation in the largest industrial and transport center of Northern Mongolia (Darkhan) // Applied Geochemistry. 2019. Vol. 107. P. 80–90. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2019.05.017](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.05.017).
17. Krivoruchko K., Gribov A., Krause E. Multivariate Areal Interpolation for Continuous and Count Data // Procedia Environmental Sciences. 2011. Vol. 3. P. 14–19. DOI: [10.1016/j.proenv.2011.02.004](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.02.004).
18. Population of Mongolia, by region, aimag and the capital, urban and rural (Population at the end of the year). URL: <http://old.1212.mn/statHtml/statHtml.do>.
19. Sun X., Rosin P., Martin R., Langbein F. Fast and Effective Feature-Preserving Mesh Denoising // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2007. Vol. 13. No 5. P. 925–938. DOI [10.1109/TVCG.2007.1065](https://doi.org/10.1109/TVCG.2007.1065).
20. Timofeev I., Kosheleva N., Kasimov N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 242. P. 279–289. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.04.090](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.090).

REFERENCES

1. Bogdanova M.D., GavriloVA I.P., Gerasimova M.I., Elementarnye landshafty kak ob'ekty landshaftno-geokhimicheskogo kartografirovaniya (Elementary Landscapes as an object of landscape-geochemical mapping), *Vestnik Mosk. un-ta, Seriya 5, Geografiya*, 2012, Iss. 1, pp. 23–28.
2. *Geomorfologiya Mongol'skoi Narodnoi Respubliki* (Geomorphology of the Mongolian People's Republic), Moscow: Nedra, 1982, 256 p.

3. Krasil'nikov P.V. (Ed.), *Geostatistika i geografiya pochv* (Geostatistics and Soil Geography), Biological Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Moscow: Nauka, 2007, 175p.
4. Glazovskaya M.A., *Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniy prirodnkh landshaftov* (Geochemical foundations of typology and methods of research of natural landscapes), Smolensk: Oykumena, 2002, 288 p.
5. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A., *Geostatistika: teoriya i praktika* (Geostatistics: Theory and Practice), Moscow: Nauka, 2010, 327 p.
6. Murzaev E.M., *Mongol'skaya Narodnaya Respublika: Fiziko-geograficheskoe opisaniye* (Mongolian People's Republic: Physical-geographic description), Moscow: Geografiz, 1952, 472 p.
7. Perel'man A.I., Kasimov N.S., *Geokhimiya landshaftov* (Landscape geochemistry), Moscow: Asteriya-2000, 2000, 610 p.
8. Polynov B.B., *Izbrannye trudy* (Selected Works), Moscow: Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1956, 751 p.
9. Saet Ju.E., Revich B.A., Janin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishhenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ja., Achkasov A.I., Sarkisjan S.Sh., *Geochemistry of the environment*, Moscow: Nedra, 1990, 335 p.
10. Timofeev I.V., Entin A.L., *Postroenie karty rodov elementarnykh landshaftov na osnove tsifrovoy modeli rel'efa dlya territorii g. Darkhan (Mongoliya)* (Landscape-Geochemical Position Mapping Based on Digital Elevation Model of Darkhan (Mongolia)), *Proc. XIII mezhdunarodnogo simpoziuma Problemy ekoinformatiki*, 2018, pp. 171–175.
11. Demetriades A., Birke M., *Urban Geochemical Mapping Manual: Sampling, Sample preparation, Laboratory analysis, Quality control check, Statistical processing and Map plotting*, Brussels: EuroGeoSurveys, 2015, 162 p.
12. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J., System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4., *Geoscientific Model Development*, 2015, Vol. 8, Iss. 7, pp. 1991–2007, DOI: [10.5194/gmd-8-1991-2015](https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015).
13. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics*, 2007, Vol. 45, No. 2, pp. RG2004, DOI: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183).
14. Florinsky I.V., *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, Amsterdam: Academic Press, 2016, 486 p.

15. Johnson C.C., Demetriades A., Locutura J., Ottesen R.T. (Eds), *Mapping the Chemical Environment of Urban Areas*, Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2011, 616 p.
16. Kosheleva N.E., Timofeev I.V., Kasimov N.S., Sandag, E.A., Geochemical transformation of soil cover and woody vegetation in the largest industrial and transport center of Northern Mongolia (Darkhan), *Applied Geochemistry*, 2019, Vol. 107, pp. 80–90, DOI: [10.1016/j.apgeochem.2019.05.017](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.05.017).
17. Krivoruchko K., Gribov A., Krause E., Multivariate Areal Interpolation for Continuous and Count Data, *Procedia Environmental Sciences*, 2011, Vol. 3, pp. 14–19, DOI: [10.1016/j.proenv.2011.02.004](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.02.004).
18. Population of Mongolia, by region, aimag and the capital, urban and rural (Population at the end of the year), URL: <http://old.1212.mn/statHtml/statHtml.do>.
19. Sun X., Rosin P., Martin R., Langbein F., Fast and Effective Feature-Preserving Mesh Denoising, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, Vol. 13, No 5, pp. 925–938, DOI [10.1109/TVCG.2007.1065](https://doi.org/10.1109/TVCG.2007.1065).
20. Timofeev I., Kosheleva N., Kasimov N., Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia, *Journal of Environmental Management*, 2019, Vol. 242, pp. 279–289, DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.04.090](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.090).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-28-56



Ссылки для цитирования:

Шилов П.М. Топографические условия дренируемости почвенного покрова Владимирского Ополя // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 28-56. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-28-56

Cite this article as:

Shilov P.M., Topographic conditions of soil drainage of Vladimir Opolie, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 28-56, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-28-56

Благодарность:

Исследование выполнено в рамках темы госзадания №0591-2020-0029, а также при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00233-а.

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of the State assignment No. 0591-2020-0029 and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), scientific project No. 19-05-00233-a.

¹Топографические условия дренируемости почвенного покрова Владимирского Ополя

© 2020 г. П. М. Шилов

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
e-mail: pavelshilov@gmail.com.

Поступила в редакцию 28.05.2020, после доработки 15.12.2020,
принята к публикации 17.12.2020

Резюме: В статье продемонстрирован подход к цифровому картографированию топографических условий дренируемости почвенного покрова Владимирского Ополя. Топографические условия модельного участка охарактеризованы цифровой моделью рельефа и производными от нее локальными и региональными морфометрическими величинами с разрешением сетки 30 × 30 м. Разнообразие условий

¹ статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

переувлажнения описано 193 точками почвенного обследования с морфологической характеристикой степени дренируемости, из которых 170 принадлежит почвенным разрезам Госкомзема РСФСР. На основе сопоставления почв, ранжированных по степени переувлажнения, и морфометрических характеристик рельефа средствами канонического дискриминантного анализа рассчитан топографический фактор дренируемости (ТФД), объясняющий 70% изменчивости гидроморфизма почв. При помощи ТФД численно обобщено влияние характеристик формы рельефа, высоты базиса эрозии, соотношения водосборной площади и крутизны (топографический индекс влажности) на дифференциацию избыточного увлажнения почвенного покрова. В диапазоне ТФД > -0.5 упорядочены серые лесные почвы, приуроченные к дренируемым моренно-эрозионным равнинам, полого-покатым и крутым склонам долин. Область ТФД < -0.5 соответствует серым лесным слабogleеватым и gleеватым почвам, характерным для слабодренируемых пологих склонов равнин, элементов ложбинной сети и западин.

Ключевые слова: гидроморфизм, серые лесные почвы, канонический дискриминантный анализ.

²Topographic conditions of soil drainage of Vladimir Opolie

P. M. Shilov

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

Received 28.05.2020, Revised 15.12.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: This article demonstrates an approach to digital mapping of soil drainage in Vladimir Opolie controlled by topographic conditions. Topographic conditions of the key area are described by a digital terrain model and morphometric parameters with resolution of 30 m. The variety of soil drainage is represented by soil survey data of the RSFSR Goskomzem, which includes 170 soil observations with morphological characteristic of the degree of soil hydromorphism. Linear combination of the most significant

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

morphometric parameters is calculated by the means of canonical discriminant analysis. This combination also interpreted as topographically induced soil drainage explains 70% of spatial variation of soil hydromorphism. Scores above 0.5 relate to gray forest soils of well drained moraine-erosional plains, gently and steep slopes of valleys. Scores below 0.5 relate to gleyic grey forest soils of shallow slopes of plains, deep valleys and depressions with poor soil drainage conditions.

Keywords: hydromorphism, grey forest soils, canonical discriminant analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Нечерноземье – зона рискованного земледелия с преимущественно выборочным освоением ареалов наиболее благоприятных земель. К числу лимитирующих факторов, которые определяют степень земледельческой освоенности и ее региональную изменчивость в гумидных ландшафтах Нечерноземья, относится сезонное или постоянное переувлажнение почв. В зависимости от степени избыточного увлажнения почвы, длительности и интенсивности его периодов развиваются анаэробные условия, которые влияют на сроки созревания сельскохозяйственных культур и их урожайность ([Зайдельман, 1975](#); [Прохорова, Сорокина, 1975](#)). Почвы с контрастными агроэкологическими характеристиками водного режима имеют низкую агрономическую совместимость относительно применяемых агротехнологий и систем удобрений ([Шеин и др., 2017](#)).

Накопление избыточной влаги в почвенном профиле обусловлено тремя факторами: 1) условиями увлажнения – соотношением параметров климата: количество атмосферных осадков, испаряемость, суммарный сток; 2) рельефом поверхности и 3) гранулометрическим составом почвообразующих пород ([Зайдельман, 1985](#)). Значительная протяженность Нечерноземной зоны привела к зонально-провинциальной, мозаичной картине изменчивости литолого-геоморфологических и гидротермических условий почвообразования ([Агроприродное..., 1987](#); [Гулинова, 1978](#); [Почвенный покров Нечерноземья..., 1986](#)). Разнообразие условий перераспределения влаги обуславливает изменчивость компонентного состава почвенного покрова и долевое участие в нем переувлажненных почв.

Относительно низкая степень гидроморфизма в Нечерноземье характерна для ополей ([Николаев, 2013](#)). К их числу относится Владимирское Ополье, расположенное на границе Ярославской, Владимирской и Ивановской областей, в северо-восточной части Клинско-Дмитровской гряды (рис. 1). Большая густота эрозионного расчленения ($>1 \text{ км/км}^2$) и лёссовидные почвообразующие породы обусловили преобладание дренируемых серых лесных почв в структуре почвенного покрова Владимирского Ополья ([Физико-географическое..., 1963](#)). Несмотря на доминантное положение дренируемых серых лесных почв, в почвенном покрове ополья встречаются переувлажненные почвы ([Савастру, 1999](#); [Симакова, 1987](#)).

Цель данного исследования заключается в оценке влияния топографического фактора на изменчивость состава водномиграционных структур почвенного покрова в однородных климатических и литологических условиях Владимирского Ополья. Под топографическим фактором понимается совокупность характеристик рельефа земной поверхности ([Jenny, 1941](#); [Troeh, 1964](#)). К числу таких характеристик относят локальные и нелокальные (региональные) морфометрические величины, описывающие механизмы перераспределения влаги – показатели формы, кривизны, крутизны, водосборной площади и др. ([Сысцев, 2003](#); [Shary et al., 2002](#); [Florinsky, 2016](#); [Hengl et al., 2009](#)). Несмотря на различные физико-географические условия роль ведущих факторов дифференциации почвенного увлажнения играют не более четырех-пяти морфометрических переменных из нескольких десятков известных ([Bell et al., 1994](#); [Gillin et al., 2015](#); [Malone et al., 2018](#); [Møller et al., 2019](#)). В почвенно-ландшафтных исследованиях такие факторы выступают неотъемлемой основой цифрового картографирования структуры почвенного покрова или его отдельных свойств ([Debella-Gilo et al., 2009](#); [Odeh et al., 1994](#); [Thompson et al., 2006](#); [Gillin et al., 2015](#)), почвенно-агроэкологической оценки ([Липкина, 1993](#); [Рублюк, 2003](#), [Сорокина, 2002](#)).

В данной работе решаются следующие методические вопросы исследования факторов: 1) выявление индивидуального и совместного вклада нескольких независимых морфометрических переменных в пространственное варьирование почвенного увлажне-

ния Владимирского Ополья; 2) численное выражение совместного действия переменных в виде интегрального фактора; 3) цифровое картографирование почв разной степени увлажнения на основе совместного анализа интегрального фактора и массива почвенных описаний.

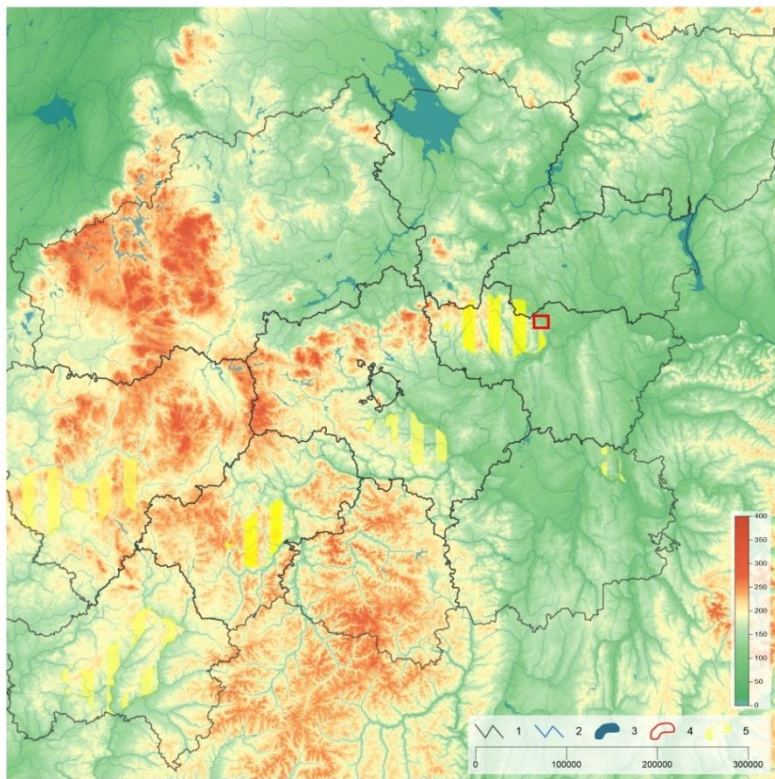


Рис. 1. Физико-географическое положение Верхневолжского ФАНЦ в центральном Нечерноземье: 1 – граница субъектов РФ, 2 – водотоки, 3 – озера и водохранилища, 4 – Верхневолжский ФАНЦ, 5 – ополья Русской равнины.

Fig. 1. Physico-geographical location of the Verkhnevolzhsky FANTS in the central Non-Chernozem Region: 1 – borders of the constituent entities of the Russian Federation, 2 – watercourses, 3 – lakes and water reservoirs, 4 – Verkhnevolzhskiy FANTS, 5 – the Russian Plain opolie.

Создание картографической модели опирается на принципы цифрового почвенного картографирования, сформулированные в зарубежных работах ([McBratney et al., 2003](#); [Minasny, McBratney, 2016](#)) и развиваемые в отечественных работах ([Савин и др., 2019](#); [Сорокина, Козлов, 2012](#); [Флоринский, 2012](#)). Ранее схожий подход моделирования ареалов переувлажнения применен автором для почв Валдайской возвышенности ([Шилов, Козлов, 2019](#)).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом картографирования выступил участок Владимирского Ополья площадью 15 тыс. га, охватывающий производственные поля Верхневолжского федерального аграрного научного центра (ФАНЦ) и соседних хозяйств (Суздальский район). Ландшафты ополья представляют собой возвышенную волнистоувалистую моренно-эрозионную равнину с сильно расчлененной овражно-балочной сетью, сложенную лёссовидными среднесуглинистыми отложениями мощностью 1.5–5 м, подстилаемыми мореной, с распаханными серыми лесными среднесуглинистыми почвами ([Ахромеев, 2008](#); [Модель..., 2005](#); [Романов, 2008](#)).

Сумма активных температур 1 900–2 000 °С. Среднегодовая сумма осадков 575 мм. Гидротермический коэффициент Селянинова за период вегетации составляет 1.4. В отдельные годы ГТК изменяется от 0.3 до 2.9. За период активной вегетации (май – сентябрь) выпадает 280 мм осадков ([Агроклиматические ресурсы..., 1968](#)). В пахотных почвах сложился периодически промывной тип водного режима ([Алифанов, Лошакова, 1981](#)). С учетом почвенно-агроклиматических условий в структуре севооборотов преобладают озимая и яровая пшеница, многолетние травы, зернобобовые, картофель, кукуруза (силос) ([Модель..., 2005](#)).

Согласно почвенно-географическому районированию Владимирское Ополье относится к Среднерусской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги, Юрьев-Польскому округу возвышенных моренных равнин с серыми лесными глинистыми и тяжелосуглинистыми пылеватыми почвами со вторым гумусовым горизонтом на покровных отложениях ([Добровольский, Урусовская, 1984](#)). В структуре почвенного покрова Верхневолжского ФАНЦ доминируют серые лесные почвы всех подтипов, родов и

видов на лёссовидных суглинках ([Модель..., 2005](#)). Компонентный состав и генезис микроструктур почвенного покрова Владимирского ополья, в т. ч. структур, связанных с миграцией влаги, детально освещен во многих работах ([Алифанов, Гугалинская, 1993](#); [Макеев, Дубровина, 1990](#); [Рубцова, 1974](#); [Тюрюканов, Быстрицкая, 1971](#)). Мезоструктуры охарактеризованы в меньшей степени ([Савастру, 1999](#); [Симакова, 1987](#)).

Для моренно-эрозионных равнин характерны три типа водно-миграционных структур серых лесных почв. Дренируемые междуречья включают пятнистости серых лесных обычных, оподзоленных, остаточно-карбонатных почв, иногда почв со вторым гумусовым горизонтом. Слабодренируемые субгоризонтальные междуречья состоят из комбинаций зональных почв и их слабоглееватых аналогов. В составе полугидроморфных структур ложбин, замкнутых понижений и западин преобладают пятнистости слабоглееватых и глееватых разновидностей серых лесных обычных, оподзоленных и серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом.

В северо-восточной части участка крупномасштабного картографирования сформировались дерново-подзолистые почвы на песчаных и суглинистых моренных отложениях. Иной генезис дерново-подзолистых почв не позволяет их рассматривать в одном ряду с серыми лесными и факторами их дифференциации.

Общий порядок исследования состоит из следующих этапов:

- 1) диагностика степени переувлажнения и ранжирование почв в ряду возрастающего гидроморфизма;
- 2) оценка сопряженности пространственной изменчивости переувлажненных почв с топографическими характеристиками в двух масштабах – территории научного центра (15 000 га) и полевого участка детальной съемки (320 га);
- 3) построение карт компонентного состава водно-миграционных структур почвенного покрова;
- 4) численное выражение совместного вклада наиболее значимых топографических характеристик в дифференциацию почв разной степени переувлажнения;
- 5) верификация результатов.

Характеристика степени переувлажнения дана при помощи диагностики почвенного профиля 193 точек полевых описаний (рис. 2) в соответствии с классификацией почв СССР ([1977](#)) и указаниями по диагностике степени заболачивания почв ([Указания... 1982](#)). Массив описаний Госкомзема РСФСР ([1991](#)), Н.Г. Савастру ([1999](#)) и Д.В. Морева ([2017](#)), а также собственные результаты полевых исследований сведены к трем категориям почв шкалы возрастающего гидроморфизма:

- “Серые лесные (*Л*)” – серые лесные обычные (без признаков оглеения), серые лесные оподзоленные, серые лесные оподзоленные со вторым гумусовым горизонтом и серые лесные остаточно-карбонатные почвы.
- “Серые лесные слабogleеватые (*Лсг*)” – серые лесные оподзоленные, серые лесные оподзоленные со вторым гумусовым горизонтом и серые лесные слабogleеватые почвы, все с признаками слабого оглеения в нижней части горизонта В.
- “Серые лесные глееватые (*Лг*)” – серые лесные, серые лесные оподзоленные со вторым гумусовым горизонтом и серые лесные оподзоленные глееватые почвы со слабым или средним оглеением в горизонте ВА₂.

Отметим, что данная классификация не охватывает полное таксономическое разнообразие зональных почв, а имеет прикладной характер в вопросах картографирования миграции влаги. При делении не приняты во внимание диагностические признаки иных процессов, например, признаки эрозионно-аккумулятивных процессов, признаки различного гумусового состояния почв. Аллювиальные и дерново-подзолистые почвы исключены из модели на основе материалов крупномасштабной почвенно-земельной съемки Госкомзема.

Картографирование очагов переувлажнения предопределяет необходимость выявления наиболее информативных факторов, влияющих на миграцию влаги. В условиях относительной однородности литологического состава неоднородность увлажнения почвенного покрова ополья сопряжена с рельефом и его уровнями организации: 1) микрорельефом различного генезиса ([Алифанов, 1986](#); [Величко и др., 1996](#)); 2) мезорельефом моренно-эрозионных равнин ([Савастру, 1999](#)).

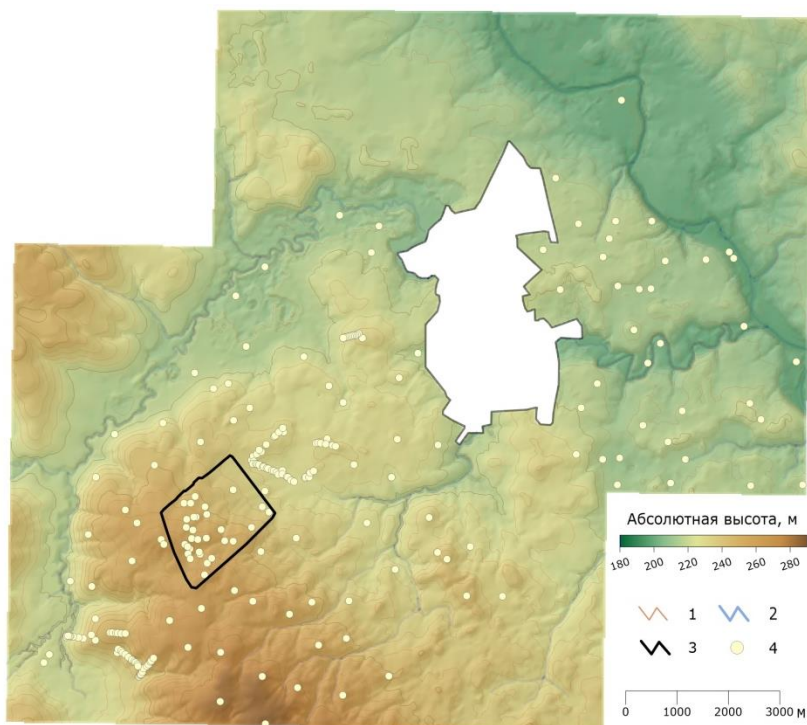


Рис. 2. Цифровая модель рельефа Верхневолжского ФАНЦ (разрешение ячейки 30×30 м): 1 – основные горизонтали; 2 – водотоки; 3 – граница участка детальной почвенной съемки; 4 – точки почвенных описаний.

Fig. 2. Digital elevation model of Upper Volga FANTS (cell size 30×30 m): 1 – main topographic contour lines; 2 – watercourses; 3 – boundary of detailed soil survey plot; 4 – soil description points.

В основу цифрового картографирования совместной изменчивости почвенного гидроморфизма и топографических факторов его дифференциации положена сетка с регулярным шагом, в ячейках которой сопоставляются, с одной стороны, категории почв с различной степенью переувлажнения, а с другой – совокупность характеристик мезорельефа (факторов), потенциально определяющих миграцию влаги. Топографические условия Верхневолжского ФАНЦ охарактеризованы на основе ЦМР с пространствен-

ным разрешением 30×30 м (рис. 2). ЦМР участка детальной съемки получена с БПЛА Геоскан-201 Агро (рис. 4А). Первичная ЦМР с разрешением 10 см обработана в следующем порядке: 1) фильтрация агрогенного микрорельефа ([Минаев и др., 2019](#)), который играет роль “шума” на крупномасштабной модели; 2) агрегация размера ячейки до 20×20 м. Для сравнительного анализа ряда почв с расчетными морфометрическими величинами ([Сысцев, 2003](#); [Florinsky, 2016](#)) в двух масштабах выбрано близкое пространственное разрешение ЦМР, которое отражает условия миграции влаги на масштабном уровне мезорельефа.

Сопряженность пространственной изменчивости гидроморфизма почвенного покрова с топографическими факторами оценена средствами канонического дискриминантного анализа ([Джонгман, 1999](#); [Пузаченко, 2004](#); [Webster, Burrough, 1974](#)). С его помощью решены три вычислительные задачи: 1) оценка индивидуального и совокупного вклада морфометрических характеристик в дифференциацию L , $L_{сг}$ и $L_{г}$ почв; 2) определение наиболее значимых морфометрических величин на основе критерия Фишера; 3) прогноз условной вероятности L , $L_{сг}$ и $L_{г}$ в ячейках сетки. В основе прогноза условной вероятности [1] лежит расчет дистанции Махаланобиса между элементами сетки и центрами областей каждой из трех категорий почв:

$$P_{L/L_{сг}/L_{г}} = \frac{e^{(0,5 \cdot D_{L/L_{сг}/L_{г}}^2)}}{e^{(0,5 \cdot D_L^2)} + e^{(0,5 \cdot D_{L_{сг}}^2)} + e^{(0,5 \cdot D_{L_{г}}^2)}}, \text{ где} \quad [1]$$

$$D_{L/L_{сг}/L_{г}} = \sqrt{(x_i - \bar{x}_{L/L_{сг}/L_{г}}) \times (y_i - \bar{y}_{L/L_{сг}/L_{г}}) \times \dots \times S^{-1}}$$

– дистанция Махаланобиса ячейки в пространстве топографических факторов:

$x_i, y_i \dots$ – значения морфометрической величины в ячейке i ;

$\bar{x}, \bar{y}, \dots$ – средние значения морфометрической величины для каждой категории почв (табл. 1);

S^{-1} – обратная ковариационная матрица.

Кроме того, канонический дискриминантный анализ позволяет численно выразить совместное участие наиболее значимых факторов в разделимость категорий ([Козлов, Сорокина, 2012](#)). В результате вычисления определяется линейная комбинация [2] характеристик рельефа, в диапазоне которой средние значения дискриминируемых L , $Lc2$ и Lc категорий почв максимально отличаются друг от друга. Данная комбинация факторов является канонической дискриминантной функцией ([Джонгман, 1999](#)):

$$f_i = u_0 + u_1X_{1i} + u_2X_{2i} + \dots + u_kX_{kn}, \text{ где} \quad [2]$$

f_i – значение канонической дискриминантной функции в точке i ;

u_i – вес, принадлежащий фактору;

X_{ji} – значения фактора j в точке i .

Коэффициенты канонических функций подбираются таким образом, чтобы: 1) их средние значения для категорий почв максимально отличались друг от друга; 2) переменные не были скоррелированы между собой. При соответствующей интерпретации ([Пузаченко и др., 2006](#); [Carroll et al., 2006](#)) канонические переменные можно рассматривать как интегральные и независимые топографические факторы дифференциации почвенного увлажнения, описывающие различные механизмы миграции влаги в почвенном покрове.

Итоговая детерминированность модели заведомо неполная из-за влияния незатронутых факторов – микрорельефа, глубины подстилания мореной, условий землепользования, а также возможных ошибок морфологической диагностики и неточностей географической привязки описаний почв.

Верификация крупномасштабной модели выполнена путем сравнения компонентного состава почвенного покрова с результатами съемки полевого участка площадью 320 га.

Таблица 1. Топографические факторы почвенного увлажнения
Table 1. Topographical factors of soil wetting

Верхневолжский ФАНЦ						Участок детальной почвенной съемки				
Морфометрическая величина	F	Уровень значимости	Почвы			F	Уровень значимости	Почвы		
			L	Лс2	Л2			L	Лс2	Л2
Топографический индекс превышений ¹ в окрестности..., м (TPI...) (Weiss, 2000)	100	0.005	0.29	-0.13	-0.3	4.2	0.022	0.11	-0.15	-0.31
	1 000	0.000	2.86	-1.28	-1.78	-	-	-	-	-
Топографический индекс влажности ² , безразмерный (TWI) (Florinsky, 2016)	12.4	0.000	8.65	10.2	11.7	6.9	0.002	12.2	13.6	15.0
Высота базиса эрозии, м (CNBL) (Conrad et al., 2002)	7.1	0.001	228.6	230.5	232.1	3.3	0.049	153.9	152.6	152.9

Примечание. ¹Z(0) – Z(r), где Z(0) – абсолютная высота центрального пикселя, Z(r) – средняя высота пикселей, удаленных от Z(0) на r; ² $\ln(\frac{\alpha}{\tan\beta})$, где α – площадь водосбора, β – крутизна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В совокупности топографические условия объясняют 75% изменчивости почвенного увлажнения, остальные 25% – особенности строения микрорельефа и литологического строения лёссовидных суглинков. Из 20 расчетных морфометрических характеристик наиболее значимы следующие (табл. 1): форма земной поверхности (топографический индекс превышений), площадь и уклон водосбора (топографический индекс влажности), базис эрозии.

Компонентный состав ПК определен на основе выражения [1]. Дистанции Махаланобиса [3] для каждого элемента ячейки до центра классов L , $L_{сг}$ и $L_{г}$ рассчитаны по формулам:

$$D_L = \sqrt{(TPI100_i - 0,29) \times (TPI1000_i - 2,86) \times (TWI_i - 8,65) \times (CNBL_i - 228,6)} \times S^{-1}$$

$$D_{L_{сг}} = \sqrt{(TPI100_i + 0,13) \times (TPI1000_i + 1,28) \times (TWI_i - 10,2) \times (CNBL_i - 230,5)} \times S^{-1} \quad [3]$$

$$D_{L_g} = \sqrt{(TPI100_i + 0,3) \times (TPI1000_i + 1,78) \times (TWI_i - 11,7) \times (CNBL_i - 232,1)} \times S^{-1},$$

где S^{-1} – обратная ковариационная матрица:

6.317	-0.212	0.732	0.025
-0.212	0.106	0.027	-0.003
0.732	0.027	0.512	0.007
0.025	-0.003	0.007	0.006

Длительный застой влаги наблюдается в незадернованных элементах ложбинной сети и западинах с серыми лесными глееватыми почвами (рис. 3В). Комбинации с преобладанием дренируемых серых лесных почв характерны для моренно-эрозионных равнин, полого-покатых и крутых эрозионных склонов речных долин (рис. 3А). Промежуточное положение занимают слабонаклонные моренно-эрозионные равнины, вытянутые слабонаклонные эрозионные шлейфы с преобладанием серых лесных слабоглееватых почв в составе почвенных комбинаций (рис. 3Б).

Наибольшее влияние на изменчивость гидроморфизма оказывает топографический индекс влажности ([Ågren et al., 2014](#);

[Grabs et al., 2009](#); [Lidberg et al., 2019](#)). Второй по значимости фактор увлажнения – топографический индекс превышений, описывающий форму мезорельефа. Третий фактор – высота базиса эрозии, вычисленная в каждом элементе сетки на основе интерполяции высот в тальвегах ([Conrad et al., 2015](#)). Данная величина редко рассматривается в работах по исследованию факторов почвенного увлажнения ([Bock, Köthe, 2008](#)). Значения базиса эрозии в элементах сетки отражают потенциальный уровень, ниже которого не могут опуститься почвенно-грунтовые воды. Максимальные значения базиса эрозии характерны для дренируемых междуречий с глубоким залеганием уровня почвенно-грунтовых вод, минимальные – для глубоких долин с избыточным поверхностным увлажнением (табл. 1).

Разнообразие топографических условий упорядочено в виде одной канонической переменной – топографического фактора дренируемости – ТФД [4]. В диапазоне ТФД категории почв упорядочены по нарастанию степени гидроморфизма. ТФД объясняет 51% изменчивости увлажнения почв:

$$\text{ТФД} = 0,4 \times TPI_{100\text{м}} + 0,5 \times TPI_{1000\text{м}} - 0,5 \times TWI - 0,4 \times CNBL \text{ [4]}$$

Область значений (> -0.5) соответствует дренируемым серым лесным почвам (рис. 3Г). В области отрицательных значений расположены серые лесные слабоглееватые ($-1.3 \dots -0.5$) и серые лесные глееватые (< -1.3) почвы. Степень дренируемости обратно пропорциональна топографическому индексу влажности, базису эрозии, и прямо пропорциональна топографическому индексу превышений.

Выражение [4] позволяет рассчитать значения топографического фактора дренируемости для каждого элемента регулярной сетки в масштабе Верхневолжского ФАНЦ. На полученной карте (рис. 3Г) отражено увлажнение почвенного покрова, обусловленное совместным действием топографических факторов.

Формирование автоморфных почвенных комбинаций приурочено к дренируемым моренно-эрозионным равнинам, пологопокатым и крутым склонам с рассеянием влаги. Общая доля таких участков (значения ТФД > -0.5) составляет 80% территории Верх-

неволжского ФАНЦ. В составе комбинаций преобладают серые лесные дренируемые почвы (*Л*) с долевым участием более 80%.

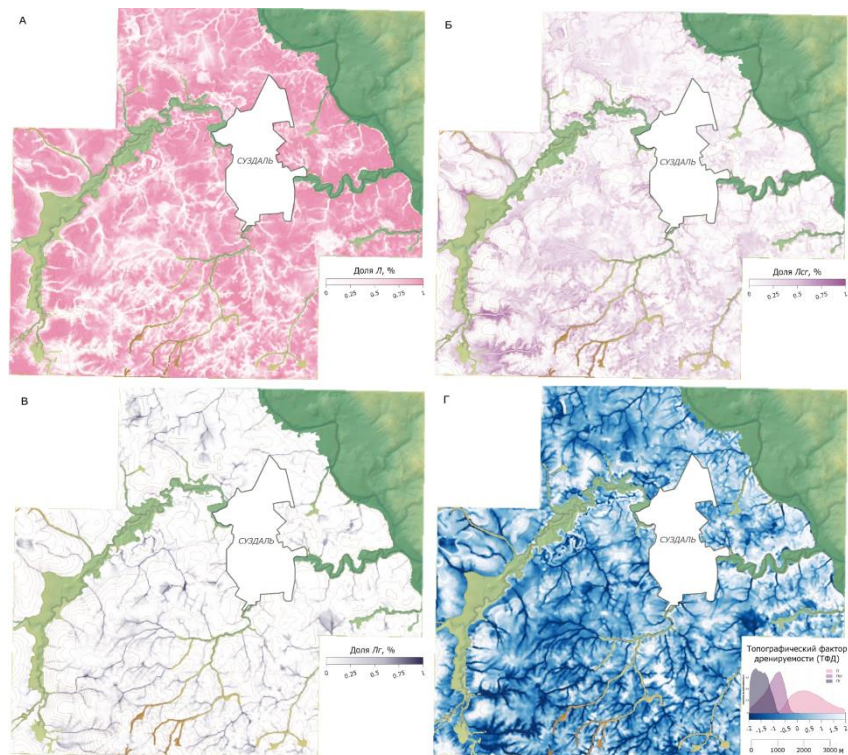


Рис. 3. Компонентный состав почвенных комбинаций (%) Верхневолжского ФАНЦ: А – серые лесные почвы (*Л*); Б – серые лесные слабоглееватые почвы (*Лсг*); В – серые лесные глееватые почвы (*Лг*); Г – топографический фактор дренируемости почв.

Fig. 3. Composition of soil cover (%) of Upper Volga FANTs: А – gray forest soils; Б – gray forest slightly gley soils; В – gray forest gleyic soils; Г – topographical factor of soil drainage.

В свою очередь, максимальная концентрация стока характерна для ложбин, западин, водосборных понижений со значениями ТФД меньше -1.3. В структуре почвенного покрова в равной доле участвуют *Лсг* (45%) и *Лг* (42%). Диапазон ТФД (-1.3...-0.5)

характерен для пологих приводораздельных склонов моренно-эрозионных равнин и пологонаклонных эрозионно-аккумулятивных шлейфов, конусов выноса с замедленным дренажем. В составе комбинаций равные доли разделяют *Л* и *Лсг* (по 43%). Общая площадь полугидроморфных структур почвенного покрова составляет 20%.

Упорядочивание категорий почв в диапазоне ТФД позволяет рассматривать неопределенность прогноза как площадь пересечения *Л*, *Лсг* и *Лг* на линейной шкале фактора (рис. 3Г). Наиболее изолированы на шкале ТФД серые лесные почвы. Перекрытие диапазонов ТФД (> 50%) характерно для серых лесных слабogleеватых и глееватых почв. Это может указывать на недостаточную информативность топографических условий при объяснении дифференциации *Лсг* и *Лг*.

Результаты свидетельствуют о двукратном превышении доли полугидроморфных почв (20%) по сравнению с данными почвенного обследования Госкомзема (1991). Для верификации результатов крупномасштабного картографического моделирования проведено сопоставление доли прогнозируемых категорий *Л*, *Лсг* и *Лг* в пределах полевого участка детальной почвенной съемки (рис. 4).

Структура модели полевого участка близка к структуре крупномасштабной модели – в значимые морфометрические величины вошли топографический индекс превышений, топографический индекс влажности и базис эрозии (табл. 1), объясняющие 71% изменчивости почвенного увлажнения.

На основе данной модели рассчитаны условные вероятности *Л*, *Лсг* и *Лг* (рис 4А–В) и значения топографического фактора дренируемости (рис. 4Г) для элементов регулярной сетки полевого участка. ТФД [5] объясняет 78% изменчивости почвенного увлажнения:

$$\text{ТФД} = 0,6 \times TPI_{100\text{м}} - 0,8 \times TWI - 0,6 \times CNBL \quad [5]$$

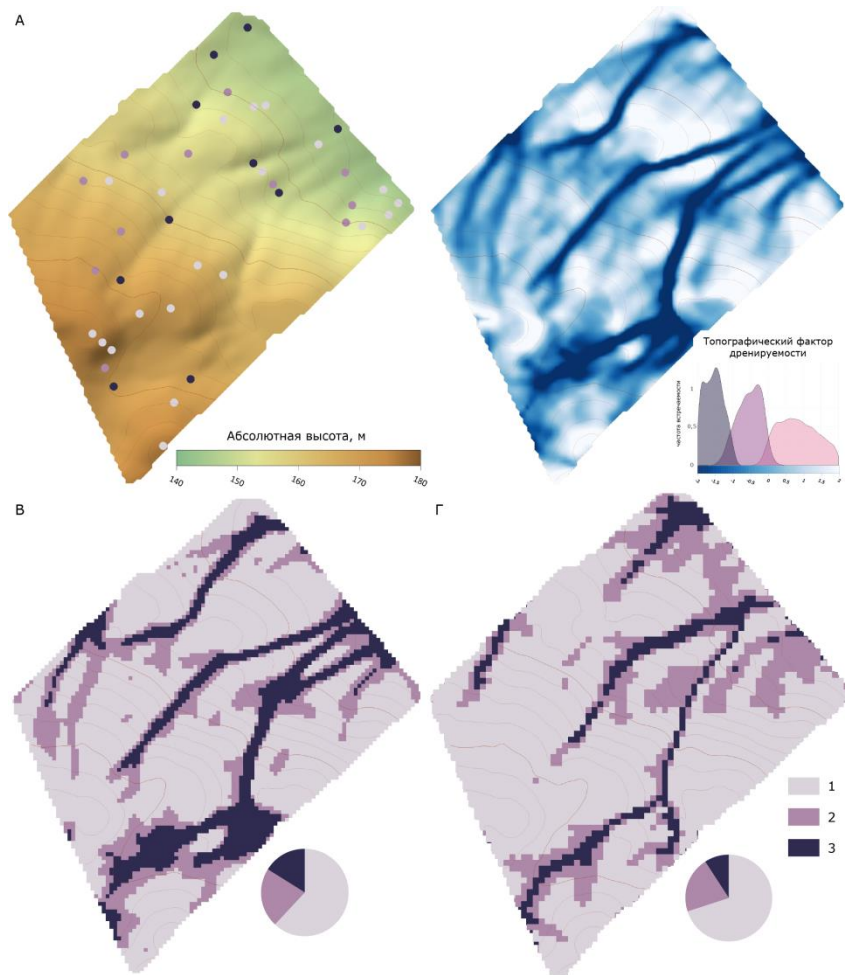


Рис. 4. Участок детальной почвенной съемки: А – ЦМР с разрешением 20×20 м; Б – Топографический фактор дренируемости (ТФД); В – Карта доминантной почвы; Г – Фрагмент карты доминантной почвы в крупном масштабе: 1 – Л, 2 – Лсг, 3 – Лг.

Fig. 4. Detailed soil survey plot: A – DEM with 20×20 m resolution; B – Topographically induced soil drainage (TSD); C – Dominant soil map; D – Large scale fragment of dominant soil map: 1 – Л, 2 – Лсг, 3 – Лг.

В области $\text{ТФД} < 0$ расположены ложбины и водосборные понижения с сочетаниями Лсг (< -1.1) и Лг ($-1.1 \dots 0$). $\text{ТФД} > 0$ характерен для дренируемых пологих и полого-покатых склонов моренно-эрозионной равнины с преобладанием Л . Общая доля полигидроморфных комбинаций почв составляет 36% площади поля – Лсг занимает 20%, Лг – 16%. В то же время на крупномасштабной модели занижена доля Лг – 9%. Процент совпадений Лсг и Лг составляет 35 и 42%.

Таким образом, в двух симметричных областях ТФД Владимирского Ополя расположены контрастные ареалы почвенного увлажнения: $\text{ТФД} > 0$ – серые лесные почвы в дренируемых элементах мезорельефа с рассеянием влаги, $\text{ТФД} < 0$ – полугидроморфные почвы в элементах мезорельефа с ее накоплением и замедленным дренажем.

Развитие данного подхода открывает возможности численного межрегионального сравнения факторов почвенного увлажнения Нечерноземной зоны. Для этого необходимо преодоление ряда методических ограничений: 1) переход от морфологической диагностики степени переувлажнения почвенного профиля к использованию количественных индикаторов водного режима различных генетических типов почв ([Романова, 1994](#)); 2) анализ иерархической организации рельефа Нечерноземья для целей выделения типов морфоструктур, морфоскульптур и их геоморфометрического анализа; 3) ранжирование климатических и литолого-геоморфологических факторов по их относительному вкладу в дифференциацию водно-миграционных структур почвенного покрова; 4) выявление взаимосвязи между топографическим фактором дренируемости и среднегодовыми параметрами тепло- и влагообеспеченности при различных сценариях изменения климата.

ВЫВОДЫ

1. Приведена методология упорядочивания характеристик рельефа по их индивидуальному и совокупному вкладу в изменчивость гидроморфизма почвенного покрова. Совокупный вклад характеристик находит выражение в виде топографического фактора дренируемости (ТФД). ТФД рассчитывается на основе чис-

ленного анализа категорий почв в многомерном признаковом пространстве наиболее значимых морфометрических величин региона.

2. В однородных условиях литологии и климата топографический фактор определяет до 70% изменчивости почвенного увлажнения Владимирского Ополья. Влияние рельефа на дифференциацию почвенного увлажнения определяется перераспределением атмосферных осадков с учетом формы поверхности, соотношения водосборной площади и крутизны (топографический индекс влажности) и высоты базиса эрозии. Значения ТФД > -0.5 соответствуют дренируемым моренно-эрозионным равнинам, полого-покатым и крутым склонам с преобладанием серых лесных почв (Л) в составе почвенных комбинаций. Значения ТФД < -0.5 – пологим приводораздельным склонам равнин, западинам, ложбинам и ложбинообразным понижениям, концентрирующим влагу. В отрицательном диапазоне ТФД расположены сочетания полугидроморфных серых лесных глееватых (Лсг) и серых лесных глееватых (Лг) почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Владимирской области / О.Б. Зворыкина, Т.И. Бурцева, К.Т. Васека и др. М.: Упр. гидрометеорол. службы центр. областей, 1968. 138 с.
2. Агроприродное и сельскохозяйственное районирование Нечерноземной зоны европейской части РСФСР / Л.В. Ромина, Н.А. Гвоздецкий, К.В. Зворыкин и др. М.: Изд-во МГУ, 1987. 270 с.
3. Алифанов В.М. Серые лесные почвы центра Русской равнины. Историко-генетический анализ // Эволюция и возраст почв СССР. Пушкино, 1986. С. 155–162.
4. Алифанов В.М., Гугалинская Л.А. Палеокриогенез и структура почвенного покрова Русской равнины // Почвоведение. 1993. № 7. С. 65–75.
5. Алифанов В.М., Лошакова Н.А. Водный режим серых лесных почв // Почвоведение. 1981. № 4. С. 58–70.
6. Ахромеев Л.М. Природа, генезис, история развития и ландшафтная структура ополей Центральной России. Брянск: РИО Брянского государственного университета, 2008. 182 с.

7. Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М. Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Изд-во “Наука”, 1996. 145 с.
8. Гулинова Н.В. Агроклиматические ресурсы Нечерноземной зоны РСФСР // Агрометеорологические условия и продуктивность сельского хозяйства Нечерноземной зоны РСФСР. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 17–32.
9. Джонсман Р.Г.Г. Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов. М.: РАСХН, 1999. 306 с.
10. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во МГУ, 1984. 416 с.
11. Зайдельман Ф.Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны России (генетические, агрономические и мелиоративные аспекты). Л.: Гидрометеиздат, 1985. 328 с.
12. Зайдельман Ф.Р. Режим и условия мелиорации заболоченных почв. М.: Колос, 1975. 321 с.
13. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Изд-во “Колос”, 1977. 221 с.
14. Козлов Д.Н., Сорокина Н.П. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 35–57.
15. Ландшафты Владимирской области: учеб. пособие в 2 ч. Ч. 1. Ландшафты Смоленско-Московской провинции / В.В. Романов. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. 56 с.
16. Липкина Г.С. Влияние почвообразующих пород и рельефа на плодородие дерново-подзолистых почв Центрального района России. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 03.00.27. М., 1993. 44 с.
17. Макеев А.О., Дубровина И.В. География, генезис и эволюция почв Владимирского ополья // Почвоведение. 1990. № 7. С. 5–25.
18. Минаев Н.В., Никитин А.А., Козлов Д.Н. Идентификация масштабных уровней организации рельефа пашни // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96. С. 3–21. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-3-21](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21).
19. Модель адаптивно-ландшафтного земледелия Владимирского ополья / В.И. Кирюшин, А.Л. Иванов. М.: “Агроконсалт”, 2004. 456 с.
20. Морев Д.В. Агроэкологическая оценка земель в условиях зонального ряда агроландшафтов с повышенной пестротой почвенного покрова. Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. М., 2017. 137 с.
21. Николаев В.А. Парагенезис полесий-ополей Центральной России // Вестник Московского университета. География. 2013. № 5. С. 45–50.

22. Почвенный покров Нечерноземья и его рациональное использование. М.: Агропромиздат, 1986. 245 с.
23. Почвы и рекомендации по их использованию Владимирской государственной областной сельскохозяйственной опытной станции Суздальского района Владимирской области. Владимир: Центргипрозем (Владимирский филиал), 1991. 65 с.
24. 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. 178–190.
25. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр “Академия”, 2004. 416 с.
26. Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Федяева М.В. Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотаежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat 7) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 70–79.
27. Романова Т.А. Водный режим в генетической характеристике почв гумидной зоны // Почвоведение. 1994. № 4. С. 32–39.
28. Рублюк М.В. Роль холмисто-моренного рельефа в формировании свойств дерново-подзолистых почв и урожайности картофеля в условиях Центрального района Нечерноземной зоны РФ: Дис. ... канд. с-х. наук: 06.01.04. Тверь, 2003. 177 с.
29. Рубцова Л.П. О генезисе почв Владимирского ополья // Почвоведение. 1974. № 6. С. 17–27.
30. Савастру Н.Г. Агроэкологическая оценка почвенного покрова Владимирского ополья для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия: Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27. М., 1999. 169 с.
31. Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
32. Симакова М.С. Элементарные почвенные структуры Владимирского ополья // Почвы СССР. Принципы и генетико-географические аспекты исследований. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1987. С. 50–56.
33. Сорокина Н.П. Микронеоднородность почвенного покрова полей и ее сельскохозяйственное значение // Почвы Московской области и их использование. Т. 1. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2002. С. 277–311.

34. *Сысоев В.В.* Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2003. № 4. С. 36–50.
35. *Тюрюканов А.Н., Быстрицкая Т.Л.* Ополья Центральной России и их почвы. М.: Наука, 1971. 240 с.
36. Указания по диагностике подзолистого и болотно-подзолистого типов почв по степени оглеенности. М.: Картофилиал Росземпроекта, 1982. 10 с.
37. Физико-географическое районирование Нечерноземного центра / Н.А. Гвоздецкий, В.К. Жучкова. М.: Изд-во МГУ, 1963. 451 с.
38. *Флоринский И.В.* Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение. 2012. № 4. С. 500–506.
39. *Шейн Е.В., Кирюшин В.И., Корчагин А.А., Мазиров М.А., Дембовецкий А.В., Ильин Л.И.* Оценка агрономической однородности и совместимости почвенного покрова Владимирского ополья // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1208–1215.
40. *Шилов П.М., Козлов Д.Н.* Почвенно-агроэкологическая оценка пахотнопригодности земель Валдайской возвышенности по материалам Генерального межевания // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 5–36. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-5-36](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-5-36).
41. *Ågren A.M., Lidberg W., Strömberg M., Ogilvie J., Arp P.A.* Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping – a Swedish case study // Hydrology and Earth System Sciences. 2014. Vol. 18. No. 9. P. 3623–3634.
42. *Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W.* Soil drainage class probability mapping using a soil-landscape model. Soil Science Society of America Journal. 1994. Vol. 58. No. 2. P. 464–470.
43. *Bock M., Köthe R.* Predicting the depth of hydrologic soil characteristics. Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie. 2008. Vol. 19. P. 13–22.
44. *Carroll S., Goonetilleke A., Khalil W.A.S., Frost R.* Assessment via discriminant analysis of soil suitability for effluent renovation using undistributed soil columns. Geoderma. 2006. Vol. 131. No. 1–2. P. 201–217.
45. *Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J.* System for automated geoscientific analyses (SAGA) v.2.1.4. // Geoscientific Model Development Discussions. 2015. Vol. 8. No. 2. P. 2271–2312.
46. *Debelli-Gilo M., Etzelmüller B.* Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway // Catena. 2009. Vol. 77. No. 1. P. 8–18.

47. *Florinsky I.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Puschino: Academic Press, 2016. 486 p.
48. *Hengl T., Reuter H.I.* Geomorphometry: concepts, software, applications. Amsterdam: Elsevier. 2008. 772 pp.
49. *Jenny H.* Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. New York: Dover Publications, 1941. 281 p.
50. *Gillin C.P., Bailey S.W., McGuire K.J., Gannon J.P.* Mapping of hydropedologic spatial patterns in a steep headwater catchment // Soil Science Society of America Journal. 2015. Vol. 79. No. 2. P. 440–453.
51. *Grabs T., Seibert J., Bishop K., Laudon H.* Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 373. No. 1–2. P. 15–23.
52. *Lidberg W., Nilsson M., Ågren A.* Using machine learning to generate high-resolution wet area maps for planning forest management: A study in a boreal forest landscape // Ambio. 2020. Vol. 49. No. 2. P. 475–486.
53. *Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B.* Description and spatial inference of soil drainage using matrix soil colours in the Lower Hunter Valley, New South Wales, Australia // PeerJ. 2018. Vol. 6. P. e4659.
54. *McBratney A.B., Santos M.M., Minasny B.* On digital soil mapping. Geoderma. 2003. Vol. 117. No. 1–2. P. 3–52.
55. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. Vol. 264. P. 301–311.
56. *Møller A.B., Iversen B.V., Beucher A., Greve M.H.* Prediction of soil drainage classes in Denmark by means of decision tree classification // Geoderma. 2019. Vol. 352. P. 314–329.
57. *Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model // Geoderma. 1994. Vol. 63. No. 3–4. P. 197–214.
58. *Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107. No. 1–2. P. 1–32.
59. *Thompson J.A., Pena-Yewtukhiw E.M., Grove J.H.* Soil–landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability // Geoderma. 2006. Vol. 133. No. 1–2. P. 57–70.
60. *Troeh F.R.* Landform parameters correlated to soil drainage // Soil Science Society of America Journal. 1964. Vol. 28. No. 6. P. 808–812.
61. *Webster R., Burrough P.* A Multiple discriminant analysis in soil survey // European Journal of Soil Science. 1974. Vol. 25, No. 1. P. 120–134.
62. *Weiss A.* Topographic position and landforms analysis // Poster presentation, ESRI user Conference. San Diego, CA, 2001. Vol. 200.

REFERENCES

1. Zvorykina O.B., Burtseva T.I., Vaseka K.T. i dr., *Agroklimaticheskie resursy Vladimirskoi oblasti* (Agroclimatic resources of the Vladimir region), Moscow: Upr. gidrometeorol. sluzhby tsentr. oblastei, 1968, 138 p.
2. Gvozdet'skii N.A., Zvorykin K.V. et al, *Agroprirodnoe i sel'skokhozyaistvennoe raionirovanie Nechernozemnoi zony evropeiskoi chasti RSFSR* (Agri-natural and agricultural zoning of Non-Chernozem zone of the European part of the RSFSR), Moscow: Izd-vo MGU, 1987, 270 p.
3. Alifanov V.M., *Serye lesnye pochvy tsentra Russkoi ravniny. Istoriko-geneticheskii analiz* (Gray forest soils in the center of the Russian Plain. Historical and genetic analysis), In: *Evoliutsiia i vozrast pochv SSSR* (Evolution and age of soils in the USSR), Pushchino, 1986, pp. 155–162 (232 p.)
4. Alifanov V.M., Gugalinskaia L.A., *Paleokriogenez i struktura pochvennogo pokrova Russkoi ravniny* (Paleocryogenesis and the structure of the soil cover of the Russian Plain), *Pochvovedenie*, 1993, No. 7, pp. 65–75.
5. Alifanov V.M., Loshakova N.A., *Vodnyi rezhim serykh lesnykh pochv* (Water regime of gray forest soils), *Pochvovedenie*, 1981, No. 4, pp. 58–70.
6. Akhromeev L.M., *Priroda, genezis, istoriia razvitiia i landshaftnaia struktura opolii Tsentral'noi Rossii* (The nature, genesis, development history and landscape structure of opolij central Russia), Briansk: RIO Brianskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008, 182 p.
7. Velichko A.A., Morozova T.D., Nechaev V.P., Porozhniakova O.M., *Paleokriogenez, pochvennyi pokrov i zemledelie* (Paleocryogenesis, soil cover and agriculture), M.: Izd-vo "Nauka", 1996, 145 p.
8. Gulanova N.V., *Agroklimaticheskie resursy Nechernozemnoi zony RSFSR* (Agroclimatic resources of the Non-Black Earth Zone of the RSFSR), In: *Agrometeorologicheskie usloviia i produktivnost' sel'skogo khoziaistva Nechernozemnoi zony RSFSR* (Agrometeorological conditions and agricultural productivity of the Non-Black Earth Zone of the RSFSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, pp. 17–32.
9. Jongman R.G.G., *Analiz dannykh v ekologii soobshchestv i landshaftov* (Data analysis in community and landscape ecology), Moscow: RASKhN, 1999, 306 p.
10. Dobrovol'skii G.V., Urusevskaia I.S., *Geografiia pochv* (Geography of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1984, 416 p.
11. Zaidel'man F.R., *Gidrologicheskii rezhim pochv Nechernozemnoi zony Rossii (geneticheskie, agronomicheskie i meliorativnye aspekty)* (Hydrological regime of soils in the Non-Chernozem zone of Russia (genetic, agronomic and meliorative aspects)), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 328 p.

12. Zaidel'man F.R., *Rezhim i usloviia melioratsii zabolochennykh pochv* (Regime and conditions of reclamation of swampy soils), Moscow: Kolos, 1975, 321 p.
13. Egorov V.V., Ivanova E.N., Fridland V.M., *Klassifikatsiia i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils in the USSR), Moscow: Izd-vo "Kolos", 1977, 221 p.
14. Kozlov D.N., Sorokina N.P., *Traditsii i innovatsii v krupnomasshtabnoi pochvennoi kartografii* (Traditions and innovations in the area of the large-scale soil mapping), In: *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya: teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital soil mapping: theoretical and experimental studies), Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2012, pp. 35–57 (350 p.)
15. V.V. Romanov., *Landshafty Vladimirskoi oblasti: Ch.1. Landshafty Smolensko-Moskovskoi provintsii* (Landscapes of the Vladimir region: Part 1. Landscapes of the Smolensk-Moscow province), Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2008, 56 p.
16. Lipkina G.S., *Vliianie pochvoobrazuiushchikh porod i rel'efa na plodorodie dernovo-podzolistykh pochv Tsentral'nogo raiona Rossii: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Influence of parent rocks and relief on the fertility of sod-podzolic soils in the Central region of Russia, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1993, 44 p.
17. Makeev A.O., Dubrovina I.V., *Geografiia, genezis i evoliutsiia pochv Vladimirskogo opol'ia* (Geography, genesis and evolution of soils of the Vladimir opolie), *Pochvovedenie*, 1990, No. 7, pp. 5–25.
18. Minaev N.V., Nikitin A.A., Kozlov D.N., The scale levels identification for the plowland topography organization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No. 96, pp. 3–21, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-3-21](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21).
19. Kiriushin V.I., Ivanov A.L., *Model' adaptivno-landshaftnogo zemledeliia Vladimirskogo opol'ia* (Model of adaptive landscape farming of Vladimirskoe opolye), Moscow: "Agrokonsalt", 2004, 456 p.
20. Morev D.V., *Agroekologicheskaiia otsenka zemel' v usloviakh zonal'nogo riada agrolandshaftov s povyshennoi pestrotoi pochvennogo pokrova: Diss. ... kand. biol. nauk* (Agroecological assessment of lands in conditions of a zonal series of agricultural landscapes with increased variegation of soil cover, Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 2017, 137 p.
21. Nikolaev V.A., *Paragenezis polesii-opolii Tsentral'noi Rossii* (Paragenesis of forested lowlands (polesye) and high plains (opolye) in central Russia), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geografiia*, 2013, No. 5, pp. 45–50.
22. Fridland V.M., Mikhailova R.P., *Pochvennyi pokrov Nechernozem'ia i ego ratsional'noe ispol'zovanie* (Soil cover of the Non-Chernozem Region and its rational use), Moscow: Agropromizdat, 1986, 245 p.

23. *Pochvy i rekomendatsii po ikh ispol'zovaniuu Vladimirskoi gosudarstvennoi oblastnoi sel'skokhoziaistvennoi opytnoi stantsii Suzdal'skogo raiona Vladimirskoi oblasti* (Soils and recommendations for their use of the Vladimir State Regional Agricultural Experimental Station of the Suzdal District of the Vladimir Region), Vladimir: Tsentrگiprozem (Vladimirskii filial), 1991, 65 p.
24. Prokhorova Z.A., Sorokina N.P., *Vlianie komponentov elementarnoi struktury dernovo-podzolistykh pochv na produktivnost' sel'skokhoziaistvennykh rastenii* (Influence of the components of the elementary structure of sod-podzolic soils on the productivity of agricultural plants), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, No. 8, pp. 178–190.
25. Puzachenko Yu.G., *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* (Mathematical methods in environmental and geographical researches), Moscow: Izd-vo "Akademiya", 2004, 416 p.
26. Puzachenko M.Yu., Puzachenko Yu.G., Kozlov D.N., Fedyaeva M.V., *Kartografirovanie moshchnosti organogenogo i gumusovogo gorizontov lesnykh pochv i bolot yuzhnataezhnogo landshafta (yugo-zapad Valdaiskoi vozvyshennosti) na osnove trekhmernoi modeli rel'efa i distantsionnoi informatsii (landsat 7)* (The mapping of the thickness of organic matter and humus horizons of soils and bogs in the southern taiga (Valdai hills) on the basis of digital elevation model and remote sensing data (Landsat-7)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 70–79.
27. Romanova T.A., *Vodnyi rezhim v geneticheskoi kharakteristike pochv gumidnoi zony* (Water regime in the genetic characteristics of soils in the humid zone), *Pochvovedenie*, 1994, No. 4, pp. 32–39.
28. Rubliuk M.V., *Rol' kholmisto-morennogo rel'efa v formirovanii svoystv dernovo-podzolistykh pochv i urozhainosti kartofelia v usloviyakh Tsentral'nogo raiona Nechernozemnoi zony RF: Diss. ... kand. s-kh. nauk* (The role of hilly-moraine relief in the formation of the properties of sod-podzolic soils and potato productivity in the Central Region of the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation, Cand. agric. sci. thesis), Tver, 2003, 177 p.
29. Rubtsova L.P., *O genezise pochv Vladimirskogo opol'ia* (On the genesis of the soils of the Vladimir opolye), *Pochvovedenie*, 1974, No. 6, pp. 1–27.
30. Savastru N.G., *Agroekologicheskaya otsenka pochvennogo pokrova Vladimirskogo opol'ia dlia proektirovaniia adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliia: Diss. ... kand. biol. nauk* (Agroecological assessment of the soil cover of the Vladimir opolye for the design of adaptive landscape farming systems, Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 1999, 169 p.
31. Savin I.Iu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Iu., *Sovremennyye trendy i problemy pochvennoi kartografii* (Modern trends and problems of soil mapping), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.

32. Simakova M.S., Elementarnye pochvennye struktury Vladimirskogo opolya (Elementary soil structures of the Vladimir opolye), In: *Pochvy SSSR. Printsipy i genetiko-geograficheskie aspekty issledovaniy* (Soils of the USSR. Principles and genetics-geographic aspects of research), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1987, pp. 50–56.
33. Sorokina N.P., Mikroneodnorodnost' pochvennogo pokrova polei i ee sel'skokhoziaistvennoe znachenie (Micro-heterogeneity of the soil cover of fields and its agricultural significance), In: *Pochvy Moskovskoi oblasti i ikh ispol'zovanie* (Soils of the Moscow region and their use), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2002, pp. 277–311.
34. Sysuev V.V., Morfometricheskii analiz geofizicheskoi differentsiatsii landshaftov (Morphometric analysis of geophysical differentiation of landscapes), *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2003, No. 4, pp. 36–50.
35. Tiuriukanov A.N., Bystritskaia T.L., *Opol'ia Tsentral'noi Rossii i ikh pochvy* (Opolyes of Central Russia and their soils), Moscow: Nauka, 1971, 240 p.
36. Satalkin A.I., Zhiron A.A., Ogleznev A.K., Shilova M.S., Nogina N.A., Romanova T.V., Zaks V.G., Fedorin Yu.V., Friev T.A., Ksenofontova V.A., *Ukazaniya po diagnostike podzolistogo i bolotno-podzolistogo tipov pochv po stepeni ogleennosti* (Guidelines for the diagnosis of podzolic and bog-podzolic soil types according to the degree of gleying), Moscow: Kartfilial Roszemproekta, 1982, 10 p.
37. Gvozdetskii N.A., Zhuchkova V.K., *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Nechernozemnogo tsentra* (Physical and geographical zoning of the Non-Chernozem Center), Moscow: Izd-vo MGU, 1963, 451 p.
38. Florinskii I.V., Gipoteza Dokuchaeva kak osnova tsifrovogo prognoznogo pochvennogo kartografirovaniia (k 125-letiiu publikatsii) (The Dokuchaev hypothesis as a basis for predictive digital soil mapping (on the 125th anniversary of its publication)), *Pochvovedenie*, 2012, No. 4, pp. 500–506.
39. Shein E.V., Kiriushin V.I., Korchagin A.A., Mazirov M.A., Dembovetskii A.V., Il'in L.I., Otsenka agronomicheskoi odnorodnosti i sovместимости pochvennogo pokrova Vladimirskogo opol'ia (Assessment of agronomic uniformity and compatibility of the soil cover of the Vladimir opolye), *Pochvovedenie*, 2017, No. 10, pp. 1208–1215.
40. Shilov P.M., Kozlov D.N., Soil-agro-ecological assesement of the arable land of the Valdai upland based on the general survey, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 5–36, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-5-36](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-5-36).
41. Ågren A.M., Lidberg W., Strömgren M., Ogilvie J., Arp P.A., Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping – a Swedish case study, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, Vol. 18, No. 9, pp. 3623–3634.

42. Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W., Soil drainage class probability mapping using a soil-landscape model, *Soil Science Society of America Journal*, 1994, Vol. 58, No. 2, pp. 464–470.
43. Bock M., Köthe R., Predicting the depth of hydrologic soil characteristics, *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, 2008, Vol. 19, pp. 13–22.
44. Carroll S., Goonetilleke A., Khalil W.A.S., Frost R., Assessment via discriminant analysis of soil suitability for effluent renovation using undistributed soil columns, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, No. 1–2, pp. 201–217.
45. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J., System for automated geoscientific analyses (SAGA) v.2.1.4, *Geoscientific Model Development Discussions*, 2015, Vol. 8, No. 2, pp. 2271–2312.
46. Debell-Gilo M., Etzelmüller B., Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway, *Catena*, 2009, Vol. 77, No. 1, pp. 8–18.
47. Florinsky I., *Digital terrain analysis in soil science and geology*, Puschino, Academic Press, 2016, 486 p.
48. Hengl T., Reuter H.I., *Geomorphometry: concepts, software, applications*, Amsterdam, Elsevier, 2008, 772 p.
49. Jenny H., *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*, New York, Dover Publications, 1941, 281 p.
50. Gillin C.P., Bailey S.W., McGuire K.J., Gannon J.P., Mapping of hydropedologic spatial patterns in a steep headwater catchment, *Soil Science Society of America Journal*, 2015, Vol. 79, No. 2, pp. 440–453.
51. Grabs T., Seibert J., Bishop K., Laudon H., Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model, *Journal of Hydrology*, 2009, Vol. 373, No. 1–2, pp. 15–23.
52. Lidberg W., Nilsson M., Ågren A., Using machine learning to generate high-resolution wet area maps for planning forest management: A study in a boreal forest landscape, *Ambio*, 2020, Vol. 49, No. 2, pp. 475–486.
53. Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Description and spatial inference of soil drainage using matrix soil colours in the Lower Hunter Valley, New South Wales, Australia, *PeerJ*, 2018, Vol. 6, pp. e4659.
54. McBratney A.B., Santos M.M., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, No. 1–2, pp. 3–52.
55. Minasny B., McBratney A.B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, pp. 301–311.

56. Møller A.B., Iversen B.V., Beucher A., Greve M.H., Prediction of soil drainage classes in Denmark by means of decision tree classification, *Geoderma*, 2019, Vol. 352, pp. 314–329.
57. Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J., Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model, *Geoderma*, 1994, Vol. 63, No. 3–4, pp. 197–214.
58. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V., Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 2002, Vol. 107, No. 1–2, pp. 1–32.
59. Thompson J.A., Pena-Yewtukhiw E.M., Grove J.H., Soil–landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability, *Geoderma*, 2006, Vol. 133, No. 1–2, pp. 57–70.
60. Troeh F.R., Landform parameters correlated to soil drainage, *Soil Science Society of America Journal*, 1964, Vol. 28, No. 6, pp. 808–812.
61. Webster R., Burrough P. A., Multiple discriminant analysis in soil survey, *European Journal of Soil Science*, 1974, Vol. 25, No. 1, pp. 120–134.
62. Weiss A., Topographic position and landforms analysis, *Poster presentation*, ESRI user Conference, San Diego, CA, 2001, Vol. 200.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-57-90



Ссылки для цитирования:

Рязанцев П.А. Картирование границ почвенных горизонтов методом георадиолокации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 57-90. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-57-90

Cite this article as:

Ryazantsev P.A., Mapping the boundaries of soil horizons using ground-penetrating radar, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 57-90, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-57-90

Благодарность:

Финансирование работ осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН).

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment of KarRC RAS (Department of Multidisciplinary Scientific Research KarRC RAS).

¹Картирование границ почвенных горизонтов методом георадиолокации

© 2020 г. П. А. Рязанцев

*Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Россия,
185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11,
<https://orcid.org/0000-0002-1944-9479>, e-mail: chthonian@yandex.ru.*

*Поступила в редакцию 18.05.2020, после доработки 12.11.2020,
принята к публикации 17.12.2020*

Резюме: В статье рассмотрена роль георадиолокации в решении задач почвоведения, а также на примере полевых данных оценена точность прослеживания почвенных горизонтов. Исследование текущего состояния вопроса показало, что существует значительная вариативность электрофизических свойств разных типов почв. При этом

¹ Статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

диэлектрическая проницаемость почвенных горизонтов может как увеличиваться, так и уменьшаться с глубиной. Этим фактом обусловлена необходимость параметризации почвенного профиля при георадарных исследованиях для предотвращения ошибок. На основе обобщающего анализа практических примеров установлено, что погрешность определения отдельных почвенных горизонтов георадаром составляет в среднем 2–10 см в зависимости от частоты используемой антенны и особенностей строения почвенного профиля. Для обоснования сделанных выводов проведены опытно-методические работы по прослеживанию почвенных горизонтов методом георадиолокации на примере типовых подбуров, расположенных на Заонежском полуострове (Республика Карелия), строение и состав которых были детально описаны предшествующими исследователями. Съемка выполнена георадаром ОКО-2 (Логис-Геотех, Россия) с антенным блоком с центральной частотой 400 МГц. Работы на участке велись по отдельным трансектам, с привязкой к опорному почвенному разрезу. Детальный анализ радарограмм в первую очередь обеспечил прослеживание подошвы горизонта ВС. Полученные результаты показали, что мощность почвы в пределах профиля варьирует от 23 до 32 см, а средняя ошибка наблюдений составила ± 3 см. Кроме того, выявлено влияние на запись обломков шунгитовых сланцев и дифференциация влажности в толще почвенных горизонтов. Присутствие шунгитовых сланцев приводит к формированию дифрагированных волн и увеличению амплитуд отраженного сигнала, тогда как увеличение влажности характеризуется уменьшением скоростей электромагнитной волны.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, электропроводность, радарограмма, подбур, влажность, шунгитовые сланцы.

²Mapping the boundaries of soil horizons using ground-penetrating radar

P. A. Ryazantsev

*Department of Multidisciplinary Scientific Research KarRC RAS, Russia,
186910, Petrozavodsk, Pushkinskaya str., 11*

<https://orcid.org/0000-0002-1944-9479>, e-mail: chthonian@yandex.ru.

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

Received 18.05.2020, Revised 12.11.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: The article considers the role of GPR in solving problems of soil science, as well as the accuracy of tracking soil horizons using the example of field data. The study of the current state of the issue has shown that there is significant variability in the electrophysical properties of different types of soil. In this case, the dielectric constant of the soil horizons can both increase and decrease with depth. This fact determines the need for parameterization of the soil profile in GPR studies to prevent errors. Based on a generalizing analysis of practical examples, it has been established that the error in determining individual soil horizons by a GPR is on average 2–10 cm, depending on the frequency of the GPR antenna and the structural features of the soil. Experimental and methodological work to substantiate the main conclusions was carried out to trace the soil horizons by the GPR method using the example of typical entic podzol located on the Zaonezhsky Peninsula (Republic of Karelia), the structure and composition of which were described in detail earlier. The survey was carried out by a georadar OKO-2 (Logis-Geotech, Russia) with an antenna unit with a central frequency of 400 MHz. Fieldwork on the study site was carried out along separate transects, according to the reference soil profile. A detailed analysis of the radargrams provided, first of all, tracking the base of the BC horizon. The results obtained showed that the thickness of the soil within the profile varies from 23 to 32 cm, and the average observation error was ± 3 cm. Besides, the influence on the recording of shungite shale fragments and the differentiation of moisture content in the soil horizons was revealed. The presence of shungite shale leads to the formation of diffracted waves and an increase in the amplitudes of the reflected signal, while an increase in humidity is characterized by a decrease in the velocities of the electromagnetic wave.

Keywords: dielectric constant, electrical conductivity, radargram, entic podzol, humidity, shungite shale.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время методы геофизики уверенно входят в повседневную практику почвоведения и агротехники, обеспечивая решение широкого спектра практических задач от контроля влажности до картирования почв ([Allred et al., 2008](#)). При этом объем выполняемых работ в этом направлении значительно меньше в сравнении с поисково-разведочными и инженерными исследованиями. Ограничивающим фактором для геофизических методов

при изучении почвенного профиля выступает ряд сложностей, к наиболее значимым из которых относится необходимость выполнять исследования от дневной поверхности на среднюю глубину 2 м, зачастую с сантиметровой точностью. Пространственная неоднородность почвенного покрова и временная изменчивость отдельных его свойств, например влажности, также оказывает значительное влияние на геофизические поля ([Allred et al., 2010](#)). Из всего разнообразия геофизических методов широко используются электрические и электромагнитные, такие как: методы сопротивления ([Поздняков, 2001](#); [Samouëlian et al., 2005](#)), электромагнитной индукции ([James et al., 2003](#); [Doolittle, Brevik, 2014](#)) и георадиолокации ([Liu et al., 2016](#); [Zajícováa, Chuman, 2019](#)).

Георадиолокация может служить эффективным способом оценки стратиграфии и внутренних неоднородностей почв ([Doolittle, Collins, 1995](#); [Doolittle, Butnor, 2009](#)). Система генетических горизонтов почв является благоприятным объектом, так как представляет собой набор субгоризонтальных слоев с контрастными свойствами, изменение которых находит отражение в электрофизических характеристиках. В свою очередь, метод георадиолокации предрасположен к изучению горизонтально-слоистых сред, обеспечивая сбор данных с высоким разрешением в горизонтальной и вертикальной проекциях. В подходящих условиях его применение позволяет определять глубину залегания основных почвенных горизонтов (А, В, С), а также других контрастных слоев: плотных и сцементированных, мерзлых, иллювиальных, насыщенных органическим веществом, – тогда как тонкие изменения почвенных свойств и переходные горизонты отражаются в волновом поле слабее ([Doolittle, Butnor, 2009](#)).

В таблице 1 приводятся наиболее актуальные задачи, которые могут быть решены с привлечением георадиолокации. Можно наблюдать, что активно развивается направление по изучению влажности почв. Это связано с существованием прямых эмпирических зависимостей между электрофизическими показателями почвы и степенью ее увлажнения, наиболее известное из которых уравнение Топпа ([Topp et al., 1980](#)). Также существует значительное количество исследований стратиграфии почвенного профиля.

Таблица 1. Актуальные задачи для метода георадиолокации в почвоведении

Table 1. Recent tasks of GPR in soil science

Решаемая задача	Литературный источник
Оценка уровня влажности и ее мониторинг	Huisman et al., 2003 ; Lunt et al., 2005 ; Weihermüller et al., 2007 ; Grote et al., 2010 ; Minet et al., 2012 ; Steelman et al., 2012 ; Ardekani, 2013 ; Zhang et al., 2014
Изучение строения почвенного профиля и мощности отдельных почвенных горизонтов	Doolittle, Collins, 1995 ; Simeoni et al., 2009 ; Winkelbauer et al., 2011 ; André et al., 2016 ; Pogosyan et al., 2018 ; Ikazaki et al., 2018
Картирование областей засоления	Shih et al., 1994 ; al Hagrey, Müller, 2000 ; Tsoflias, Becker, 2008
Поиск областей антропогенного загрязнения	Daniels et al., 1995 ; Cassidy, 2007 ; Rejšek et al., 2015
Исследование строения и биомассы корневых систем	Hruška et al., 1999 ; Butnor et al., 2001 ; Stover et al., 2007 ; Guo et al., 2013 ; Borden et al., 2017
Определение степени промерзания почв	Steelman et al., 2010 ; Butnor et al., 2014 ; Leger et al., 2017

Наряду с имеющимися позитивными предпосылками, георадиолокация не является универсальным методом. Остро стоит вопрос о ее применимости для разных почвенных условий. Один из существующих подходов предлагает использовать специальный индекс пригодности георадиолокации (*GPR suitability index*) с целью районирования территорий со значениями от 1 (высокий потенциал) до 6 (неподходящий) ([Doolittle et al., 2007](#)). Для расчета такого индекса привлекается целый ряд параметров: процентное содержание глины, электропроводность, коэффициент поглоще-

ния натрия, наличие карбоната и сульфата кальция и т. д. В результате строятся тематические карты, которые отражают пригодность данного метода с разной детальностью и масштабом ([Doolittle et al., 2010](#)).

Применение георадиолокации особенно эффективно при необходимости обследования больших площадей, так как метод позволяет получить большое количество данных за относительно короткое время. Экономическая оценка, выполненная на примере обследования дренажной системы на 300 га водно-болотных угодий, показала: если выполняется бурение скважин каждые 300 м, георадиолокация обеспечивает 7%-ный рост производительности и 20%-ную экономию средств со средней ошибкой в 16%, тогда как при необходимом шаге скважин в 60 м показатели возрастают до 353% и 406% соответственно ([Szuch et al., 2006](#)).

Цель настоящего исследования заключалась в выполнении комплексного анализа возможностей георадиолокации для решения задач почвоведения, а также в исследовании точности определения морфологии почвенных горизонтов на примере полевых данных.

ПРИНЦИПЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Метод георадиолокации основывается на излучении наносекундных электромагнитных импульсов фиксированной частоты в зондируемую среду с последующей регистрацией и анализом сигнала, отраженного от внутренних границ и локальных неоднородностей ([Владов, Судакова, 2017](#)). К основным характеристикам, определяющим распространение электромагнитной волны в почвах, следует отнести диэлектрическую проницаемость и электрическую проводимость. Данные величины связаны с рядом физических свойств почв: гранулометрическим составом, влажностью, плотностью, содержанием гумуса. Важным параметром в методе георадиолокации является центральная частота зондирующего сигнала, так как она определяет глубину исследования метода и разрешающую способность. Оптимальный диапазон частот для изучения большинства почвенных профилей 250–800 МГц.

Для выполнения полевых наблюдений используется георадар – прибор, состоящий из передающей (T_x) и принимающей (R_x)

антенны с фиксированной центральной частотой сигнала, блока регистрации и обработки. Наземные георадарные измерения проводятся вдоль единичных профильных линий или по системе профилей. Регистрируемый сигнал представляется в виде георадарной трассы – функции изменения амплитуды электромагнитного импульса во времени, то есть несет в себе информацию об отражении сигнала от внутренних неоднородностей при прохождении зондируемой среды. Совокупность трасс, полученных при перемещении георадара, формирует радарограмму, которая представляет собой двухмерное отображение распространения волнового электромагнитного поля в некоторой области. По горизонтальной оси радарограммы отсчитывается перемещение по профилю и учет положения каждой трассы, а по вертикальной – время, начиная от генерации до прихода отражений сигнала. Цветовой градиент характеризует интенсивность (амплитуду) отражений импульса от неоднородностей среды.

Основной способ интерпретации радарограмм заключается в поиске схожих форм импульсов на соседних трассах, составляющих ось синфазности, по которой определяется положение отражающей границы (рефлектора). Наличие рефлектора свидетельствует об изменении электрофизических свойств, и в большинстве случаев это соотносится с реально существующими почвенными границами. Кроме отраженной волны известны и другие типы, например дифрагированная волна, которая формируется на локальных объектах: валунах, корнях и т. д. (рис. 1).

Сочетание на записи волн всех видов формирует волновое поле георадиолокации, именно его необходимо проинтерпретировать для выявления реальных внутренних границ зондируемой среды. Для этого кроме выделения осей синфазности выполняется определение георадарных фаций – областей с определенной волновой картиной. Фации могут иметь разную форму (параллельные, волнистые, хаотические), а также разные протяженность, интенсивность отражений и частотный состав, что является отражением структуры, формы залегания и состава зондируемых почв и грунтов ([Старовойтов, 2008](#)).

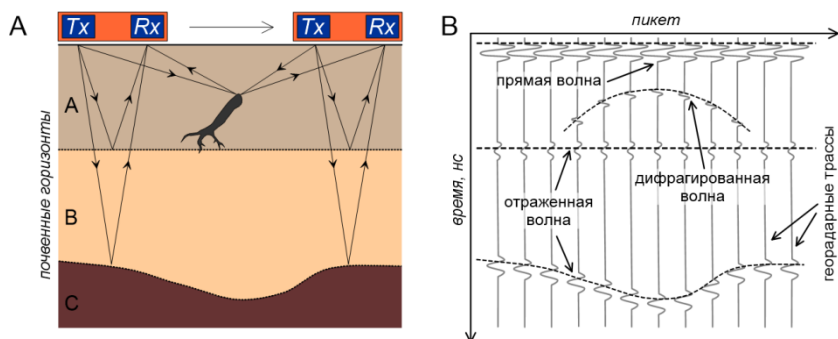


Рис. 1. Процесс выполнения георадарной съемки (А) и регистрируемая радарограмма (В).

Fig. 1. The process of GPR survey (A) and resulting radar data record (B).

Глубину залегания отражающих границ (Z) можно рассчитать следующим образом:

$$Z = \frac{V \times t}{2},$$

где V – скорость электромагнитной волны, t – время прихода импульса.

Скорость можно определить исходя из величины относительной диэлектрической проницаемости среды:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость, c – скорость света в вакууме.

Следует отметить, что относительная диэлектрическая проницаемость является величиной комплексной и включает в себя две части – действительную и мнимую, – первая из которых определяет непосредственное распространение электромагнитной волны в среде, а вторая – электрические потери (затухание волны). Данные величины зависят от частоты, однако для георадарного диапазона частот 20 МГц – 2 ГГц влияние мнимой частоты минимально. Если это условие нарушается, георадиолокация становится слабоприменимой (Annan, 2003). Относительная диэлектрическая проницаемость измеряется в условных единицах.

Для большинства грунтов известны условно-нормальные значения относительной диэлектрической проницаемости, которые для почв составляют 5–20 условных единиц. Наличие такого диапазона связано с изменчивостью содержания компонентов почв (твердая матрица, вода с растворенными солями, воздух), а также с их распределением в пространстве и с внутренними связями ([Владов, Судакова, 2017](#)).

Для образования отраженной волны необходим контраст электрофизических свойств почвенных горизонтов, а параметром, определяющим его интенсивность, служит коэффициент отражения ($K_{отр}$), который рассчитывается как:

$$K_{отр} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}},$$

где ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость вышележащего горизонта, ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость нижележащего горизонта.

Чем ближе $K_{отр}$ к ± 1 (в зависимости от параметров среды он может быть как положительным, так и отрицательным), тем интенсивность отражения выше и, как следствие, граница контрастнее. На практике рефлекторы могут возникать даже при значениях $K_{отр}$ близких к нулю, что обусловлено влиянием разности электрической проводимости ([Владов, Судакова, 2017](#)).

Условием для выделения отдельных почвенных горизонтов является отношение их мощности к преобладающей длине излучаемой электромагнитной волны в среде. Вертикальная (Δr) и горизонтальная (Δl) разрешающая способность определяются соотношениями:

$$\Delta r \geq \frac{V}{4 \cdot f_c} = \frac{\lambda}{4} \quad \text{и} \quad \Delta l \geq \sqrt{2\lambda h},$$

где f_c – центральная частота зондирующего сигнала в среде, λ – длина волны в среде. При невыполнении этого условия два маломощных слоя на записи сольются в один, так как сигналы, отраженные от них, интерферируют.

Еще один параметр необходимо учитывать при проектиро-

вании работ – коэффициент затухания, который определяется следующим равенством:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}},$$

где σ – электрическая проводимость (электропроводность) среды, μ – относительная магнитная проницаемость, ε – относительная диэлектрическая проницаемость. Таким образом, в случае изучения почв, обладающих высокой электропроводностью за счет большого содержания глины, засоления, минерализации поровой влаги и т. п., метод георадиолокации может оказаться малоэффективным.

Для относительно низких георадарных частот разрешающая способность составляет десятки сантиметров, тогда как для самых высоких – первые сантиметры. Некоторые средние показатели, которые применимы для большинства производимых георадарных антенных блоков, приводятся в таблице 2. Точность измерений также зависит от шага измерения по профилю и частоты дискретизации сигнала.

Таблица 2. Параметры съемки для антенных блоков с различной частотой зондирования

Table 2. The parameters of antenna units for different sounding frequency

Параметр	Центральная частота, МГц		
	150–250	400–700	1000–1500
Глубина зондирования, м	12–8	5–3	1.5–1.0
Разрешающая способность по глубине, см	35–25	15–10	5–3
Пространственная разрешающая способность на глубине 1 м и скорости 5 см/нс, см	26–20	16–12	10–8
Рекомендуемый шаг между трассами, мм	100–50	50–30	30–10
Нормальная временная развертка записи, нс	400–200	100–48	32–16

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

Как уже упоминалось, разнообразие почвенных свойств и их пространственная неоднородность приводит к изменчивости относительной диэлектрической проницаемости и электрической проводимости. На рисунке 2 представлена обобщающая диаграмма, демонстрирующая вариативность электрофизических свойств разных типов почв при выполнении полевых измерений методом георадиолокации. Можно наблюдать, что изменения происходят в широком диапазоне, без выраженной системы.

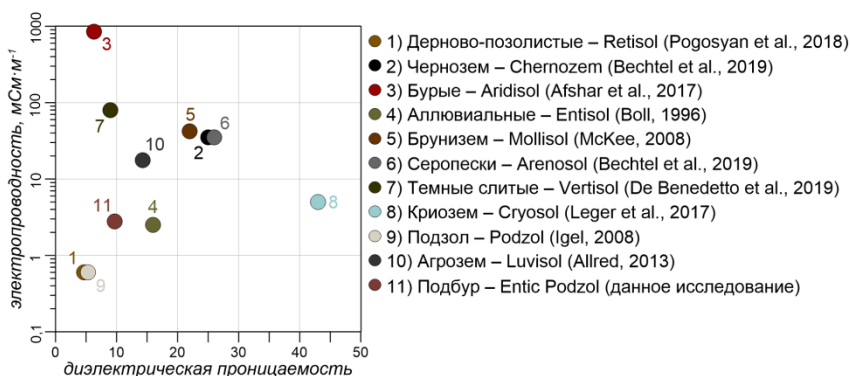


Рис. 2. Электрофизические свойства некоторых типов почв.

Fig. 2. Electrical properties of certain types of soils.

Кроме того, экспериментально доказано, что даже почвы одного типа при нахождении в разных природных обстановках, допустим при разной минерализации воды, будут отличаться в геофизических полях. Этим фактом обусловлена необходимость параметризации почвенного профиля при георадарных исследованиях для предотвращения возможных ошибок.

Следует отметить, что детальное лабораторное изучение электрофизических свойств почв с разными параметрами (содержание глины и гумуса, степень увлажнения и т. д.) и при разных измерительных условиях является отдельным научным направлением, по которому существует целый ряд экспериментальных работ ([Чудинова, 2009](#); [Бобров и др., 2019](#)). Особую роль в таких

исследованиях занимает метод рефлектометрии во временной области (*time domain reflectometry, TDR*), основанный на физических принципах во многом схожих с георадиолокацией. Данный метод при помощи специального зонда позволяет определять относительную диэлектрическую проницаемость в конкретной области почвенного разреза, он активно применяется для контроля и мониторинга влажности почв ([Robinson et al., 2003](#)).

Далее рассмотрим, как может происходить изменение электрофизических свойств в зависимости от почвенного горизонта. На рисунке 3 представлены значения относительной диэлектрической проницаемости для горизонтов А, В, ВС трех разных типов почв, которые были получены методом рефлектометрии во временной области.

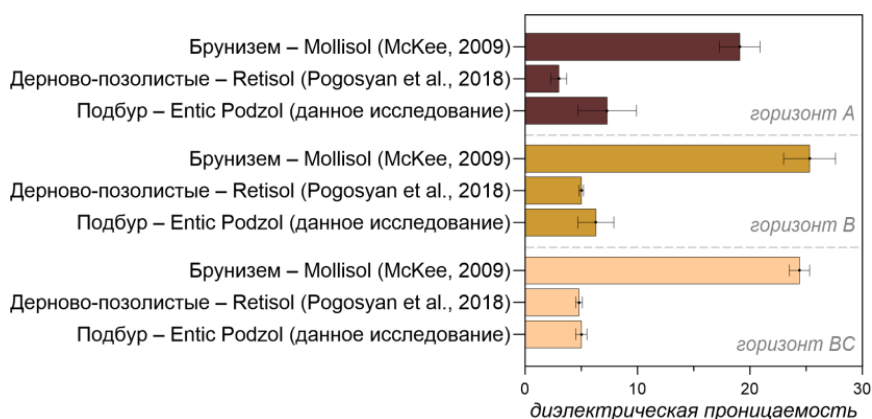


Рис. 3. Наблюдаемая вариативность относительной диэлектрической проницаемости в почвенном профиле.

Fig. 3. Variability of dielectric constant in the soil profile.

Как показал сводный анализ данных, относительная диэлектрическая проницаемость может как увеличиваться, так и уменьшаться с глубиной. В рассматриваемых случаях для каждого отдельного горизонта отклонение наблюдаемых значений от осредненного значения всего профиля составляет 10–20%. Это значит, что в ряде случаев при обработке радарограмм можно использовать общую скорость электромагнитной волны для расчета глубин

залегания рефлекторов, без присвоения отдельных значений каждому генетическому горизонту.

В свою очередь, рассчитанный коэффициент отражения для границ раздела горизонтов А–В и В–ВС в каждом случае достаточно мал, в среднем $K_{отр} = \pm 0.05$. Тем не менее, на радарограммах наблюдаются отчетливые рефлекторы. Отсюда можно сделать вывод о том, что, несмотря на схожесть горизонтов, составляющих почвенный разрез, по величинам относительной диэлектрической проницаемости (например, в случае равномерного увлажнения) иные свойства почв горизонтов (электропроводность, плотность) обеспечивают контрастные отражения сигнала.

Важным параметром применимости георадиолокации для изучения почв является разрешающая способность метода, то есть с какой точностью может быть определена глубина или мощность отдельных горизонтов. Как уже отмечалось выше, точность наблюдений зависит от центральной частоты излучаемого электромагнитного сигнала, а также свойства среды, через которую он распространяется.

Ниже представлены результаты георадарного поиска различных почвенных границ (табл. 3), включающие данные о: глубине залегания горизонта (h); центральной частоте сигнала (f_c); опробованиях буром; расчете погрешности измерений (Δ).

Анализ показывает, что использование даже относительно низкочастотных антенн позволяет получить результаты с сантиметровой точностью на глубинах до 1 м и более. В зависимости от частоты зондирования и типа почвенного профиля погрешность составляет $\pm 2\text{--}10$ см (определяется как разность глубинных отметок по данным георадара и прямых наблюдений), это обеспечивает прослеживания основных почвенных горизонтов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опытно-методические работы по картированию почвенных горизонтов методом георадиолокации выполнялись на площади Заонежского полуострова (Республика Карелия). Данная территория значительно отличается от других районов Карелии и сопредельных территорий по природным условиям почвообразования: разнообразием форм рельефа, присутствием шунгитсодержащих

почвообразующих пород, климатическим условиям и большим количеством лиственных пород в составе древостоев ([Морозова и др., 2004](#)).

Таблица 3. Точность георадара при определении глубины залегания почвенных горизонтов

Table 3. GPR accuracy in determining the depth of soil horizons

Тип почвы	Отражающий горизонт	h, см	f_c , МГц	Пробы, ед.	Δ , см
Подзолы (Podzol), Флорида, США Collins, Doolittle, 1987	Кровля глинисто-иллювиального горизонта Bt	100–178	120	4	± 6
Буроземы (Luvisol), Западная Австралия Simeoni et al., 2009	Граница между горизонтами A и B	20–120	250	37	± 10
Бурые (Aridisol), Юго-восточный Иран Afshar et al., 2017	Кровля сцементированного горизонта Buzm	35–45	250	3	± 6
Криоземы (Cryosol) Аляска, США Léger et al., 2017	Кровля вечной мерзлоты	34–95	400	7	± 7
Подбуры (Cambisol), Альпы, Германия Winkelbauer et al., 2011	Подошва гумусового горизонта Ah	4–30	800	132	± 2
Красно-желтые ферраллитные (Plinthosol), Восточная Африка Ikazaki et al., 2018	Кровля плинтитового горизонта Bmv (PP)	27–130	300, 800	4	± 3

В таких своеобразных природных условиях сформировался почвенный покров, характеризующийся чрезвычайной пестротой и сложностью, который представляет особый интерес для изучения, в том числе и с привлечением методов геофизики ([Рязанцев, Бахмет, 2020](#)).

Шунгитовые породы как почвообразующий субстрат сильно

отличаются от других материнских пород высоким содержанием углерода, гигроскопической влаги, поглотительной способностью. Содержание углерода в таких породах изменяется от 5 до 95%, и чем больше углерода, тем интенсивнее она разрушается и выветривается, обогащая почвы элементами минерального питания ([Бахмет, 2012](#)). Гранулометрический состав шунгитсодержащих почвообразующих пород разнообразен: хрящеватые пески, супеси, суглинки, реже глины. Четвертичные отложения района работ сложены главным образом ледниковой мореной, которая формирует обширные равнины, покрывающие до 80% всей площади полуострова. Морена представлена валунной супесью с мощностью варьирующей от 0.2 до 5 м ([Морозова и др., 2004](#)).

На площадях, занятых элюво-делювием шунгитовых пород и шунгитовой мореной, наиболее распространены буроземы и подбуры. Подбуры Заонежского полуострова отличаются от широко распространенных в Карелии подзолов более темной окраской, пониженной кислотностью, железистостью, а также более высоким содержанием элементов минерального питания. Их разделение на генетические горизонты осложнено каменистостью и щебнистостью.

Объектом исследования был участок подбуров с известным и хорошо изученным строением почвенного профиля, сформированных на шунгитовых сланцах, в центральной части Заонежского полуострова (62.48166 с. ш., 34.79749 в. д.) ([Разнообразие почв, 2006](#)). Для описания границ почвенных горизонтов был намечен трансект, проходящий от увлажненных оторфованных почв в низине, через вырубку к малоизмененным подбурам на возвышенностях. При выполнении работ учитывались рельеф и существующие биоценозы. Отдельно выполнена координатная привязка к опорному разрезу.

Почвенный профиль подбуров на участке по данным О.Н. Бахмет и Ю.В. Преснухина имеет следующее строение: A0 (0–6 см) – лесная подстилка; A1B (6–17 см) – темно-бурый, сильно каменистый, песчаный горизонт, присутствует органика; BC (17–24 см) – бурый горизонт, сложен обломками шунгитовых сланцев, мелкозем песчаного состава ([Разнообразие почв, 2006](#)). Изучаемые почвы суглинистые со значительным процентом крупнозема (см.

табл. 4), имеют бурый достаточно слабо дифференцированный профиль, также отмечается повышенное содержание углерода и азота ([Разнообразие почв, 2006](#)).

Таблица 4. Гранулометрический состав, содержание углерода и азота для исследуемой почвы ([Разнообразие почв, 2006](#))

Table 4. Particle size distribution, carbon and nitrogen content for the test soil (according to Raznoobrazie pochv, 2006)

Горизонт	Гранулометрический состав, %							C, %	N, %
	> 10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	< 1		
A0	-	-	-	-	-	-	-	32.7	1.29
A1B	0.9	1.3	1.3	2.0	3.1	13.3	78.1	4.0	0.27
BC	1.8	1.6	1.6	2.4	2.9	12.0	77.7	3.9	0.27

МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В задачи полевых исследований на рассматриваемом участке входило прослеживание изменения мощности почвы по данным георадиолокации, определение причин и условий формирования георадарных рефлекторов, а также выявление факторов, обуславливающих изменчивость почвенного покрова. Работы проводились с использованием георадара ОКО-2 (Логис-Геотех, Россия), оснащенного антенным блоком с центральной частотой 400 МГц. Наблюдения выполнены вдоль наземного профиля общей длиной 480 м, положение которого на местности определялось GPS навигатором. Учет перемещения осуществлен при помощи штатного датчика ДП-32. Шаг сканирования по профилю составил 5 см, что позволило получить радарограмму, которая включает 9 600 отдельных зондирующих трасс.

Для почв на участке относительная диэлектрическая проницаемость определена с опорой на имеющийся опорный разрез и данные, полученные по гиперболам дифрагированной волны, и составляет в среднем 12 ед. При используемой временной раз-

вертке 50 нс получен полезный сигнал с глубины более 1.5 м. Это позволило определить положение отражающих границ и сопоставить их с имеющимся почвенным разрезом. В текущих условиях вертикальная разрешающая способность составила 5 см, а горизонтальная – 2 см на поверхности и до 20 см на глубине в 1 м.

Регистрация и обработка данных выполнялись в программном комплексе *GeoScan32* (Логис-Геотех, Россия). Перед выполнением непосредственной интерпретации выполнялась фильтрация. Частотный анализ записи показал, что произошло смещение центральной частоты до 250 МГц, а также возник дополнительный экстремум на 20 МГц. Это свидетельствует о влиянии проводимости почв на регистрируемые данные. Низкочастотная составляющая устранена при помощи полосовой фильтрации. Также выполнена корректировка положения нуля записи и вычитание среднего для удаления сигнала прямого прохождения. С целью повышения контраста отдельных слоев на записи подбирался профиль усиления.

Кроме регистрации основного георадарного профиля, выполнялись отдельные наблюдения антенным блоком 1 700 МГц вдоль почвенных разрезов в сочетании с измерением электрофизических свойств почвенных горизонтов методом временной рефлектометрии, аппаратурой TDR200 (Campbell Scientific, USA). Для этого после подготовки разреза по его стенке с шагом 4 см втыкался зонд, которым измерялась относительная диэлектрическая проницаемость почвы. Полученные замеры представлены в виде графика, по которому можно точно оценить вариативность электрофизических свойств почвенного разреза. Далее в этом же месте на поверхности выполнен небольшой георадарный профиль. Сбор данных происходил с шагом 3 см и временной разверткой 16 нс. Такая конфигурация обеспечила глубину исследования до 60 см и разрешение порядка 1.5 см. Набор процедур обработки радарограмм соответствовал указанному выше.

В результате подобные комплексные наблюдения обеспечивают параметризацию разреза и облегчают финальную интерпретацию. Следует отметить, что большая часть Республики Карелия (в том числе Заонежский полуостров) – благоприятный регион для использования георадаров при изучении почв и четвертичных от-

ложений из-за исключительно низкой минерализации грунтовых вод, а также преобладания отложений песчаного состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим данные георадиолокации на примере профиля, проходящего с востока на запад, вдоль пологого склона от заболоченной приозерной области в сторону лесного массива. После выполнения первичной обработки на записи определялись признаки границы между горизонтом ВС и материнской породой – наличие протяженной оси синфазности, высокие амплитуды отражений, смена картины волнового поля (рис. 4).

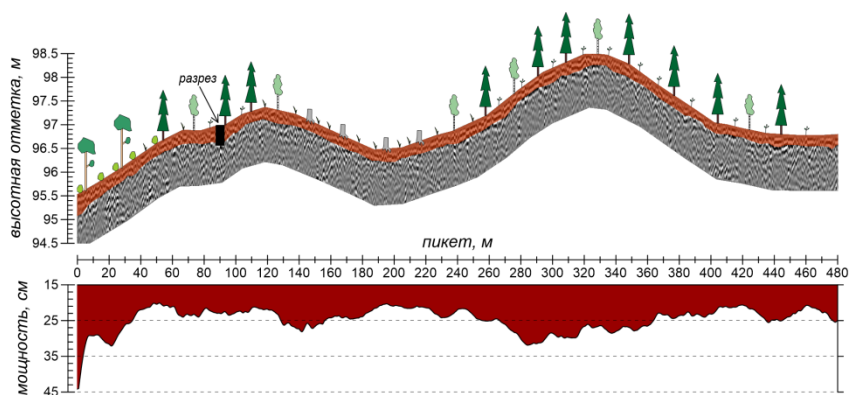


Рис. 4. Георадарный профиль на исследуемом участке (вверху) и установленная изменчивость мощности почвенного профиля (внизу).

Fig. 4. GPR transect in the studied area (above) and identified variability of soil profile thickness (below).

В результате была прослежена кровля подстилающей шунгитовой морены и определено, что вдоль профиля почвенный покров имеет дифференцированную мощность. В начальной части на пикетах (ПК) 0–30 отмечается наличие оторфованных почв. Это выражено в развитии характерного покрова сфагновых мхов и в увеличении толщины почв до 32 ± 5.0 см. Далее, между ПК 50–150 наблюдается равномерное положение нижней границы ВС,

мощность почвенного покрова вдоль профиля составляет 24 ± 1.9 см. Фрагмент профиля на ПК 150–250 расположен в пределах участка свежей вырубki, что может быть причиной частичной эрозии почвенного покрова до 23 ± 1.6 см. Следующая область ПК 265–365 соотносится с неизменным лесным массивом и, как следствие, с ненарушенными подбурами с мощностью 29 ± 2.0 см. После чего снова фиксируются условно-нормальные почвы (как на ПК 50–150) мощностью 24 ± 1.3 см.

С опорой на почвенный разрез проводился детальный анализ радарограмм, так как это позволяет выявить георадарные признаки для границ раздела горизонтов A0 и A1B, а также оценить точность измерений. Для реализации такого подхода выделен фрагмент записи в области расположения разреза (рис. 5А) и фрагмент, где мощность почв максимальна (рис. 5В). Время каждой записи составляет 15 нс, а горизонтальная протяженность – 2 м. В качестве первого этапа интерпретации радарограмм необходимо определить, как на записи выглядит отражение от искоемых границ. Существует несколько подходов для определения положения рефлектора: по первым вступлениям; пику максимальной амплитуды; фазовому переходу.

В рассматриваемом случае граница между горизонтами определяется по смене фазы импульса с “–” на “+”, так как первый такой переход полностью соответствует глубине раздела между горизонтами A0 и A1B, по данным почвенного разреза; также на этом уровне наблюдается протяженная ось синфазности (рис. 5А). Выявленная граница имеет время записи $t = 1.3$ нс при значении относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon = 12$, скорость волны составляет $V = 8.6$ см/нс, расчет глубины залегания Z дает результат в 5.5 см, что на 0.5 см отличается от прямых наблюдений в разрезе. На границе A1B–BC время записи $t = 4.2$ нс при $\epsilon = 12$ и $V = 8.6$ см/нс, глубина $Z = 18.1$ см, что на 1.0 см отличается от прямых наблюдений. Несколько иная ситуация отмечается для подошвы горизонта BC, в общем виде расчет границы верен: $t = 6.0$ нс, $V = 8.6$ см/нс, $Z = 25.8$ см, при наблюдаемых 24 см в разрезе. Наряду с этим для данной области отмечается нарушение фазы импульса и резкое возрастание амплитуды. Объяснением такого явления может служить повышенное содержание в гори-

зонте ВС крупных обломков подстилающих шунгитовых сланцев, о чем свидетельствует волнистый характер рефлектора и гиперболы дифрагированной волны. Ниже на записи наблюдается смена характера волновой картины – от параллельной фации, что является нормальным для почвы, к хаотической, соотносимой с подстилающей мореной. Анализ мгновенных амплитуд отражений (энергограммы) показал, что почвенный профиль имеет более высокую энергию отраженного сигнала в сравнении с нижележащими коренными породами.

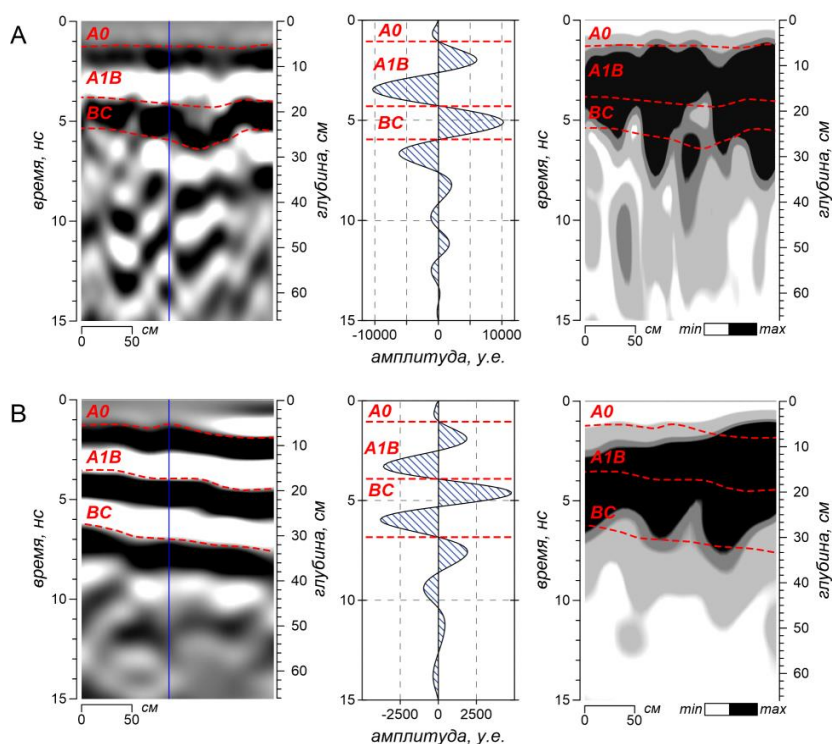


Рис. 5. Фрагмент радарграммы, отдельная трасса и энергограмма для участков почв с разной мощностью на пикете 90 (А) и пикете 290 (В) по профилю наблюдений.

Fig. 5. Fragment of radargram, a separate trace and Hilbert transformation for sections with different thickness at picket 90 (A) and picket 290 (B) along GPR profile.

Далее обратимся к фрагменту радарограммы по области, где выявлена максимальная мощность почв (рис. 5В). На записи сразу хорошо различаются интенсивные параллельные оси синфазности, характерные для зондирования горизонтальных сред. При этом отмечается сохранение условия смены фазы на границах горизонтов. Сами границы ровные вследствие отсутствия крупнообломочной фракции. Анализ отдельных почвенных горизонтов показал следующие результаты: раздел А0–А1В имеет среднее $t = 1.6$ нс, $V = 8.6$ см/нс, в итоге $Z = 6.9$ см; А1В–ВС $t = 4.0$ нс, $V = 8.6$ см/нс, а $Z = 17.2$ см; кровля материнских пород фиксируется при $t = 7.1$ нс, $V = 8.6$ см/нс, а $Z = 30.5$ см.

Анализ энергограммы также демонстрирует приуроченность интенсивных отражений к почвенной толще. Конфигурация почвенного профиля соответствует имеющемуся разрезу, а рост мощности обусловлен увеличением горизонта ВС на 5 см в сравнении с типовым разрезом. В общем виде по результатам детального анализа радарограммы и отдельных фрагментов установлено, что георадар обеспечил определение мощности профиля А0–А1В–ВС исследуемого подбуря со средней погрешностью ± 3 см.

Влияние влажности на регистрируемую волновую картину демонстрируется на примере перехода от автоморфных почв к полугидроморфным, расположенным в районе исследований. Для большей детальности измерения выполнены антенной 1 700 МГц, также привлечены данные промера относительной диэлектрической проницаемости методом рефлектометрии. На рисунке 6 представлены три фрагмента радарограммы длиной 1.5 м, отражающие переход от подбуров, расположенных на возвышенности (рис. 6А), к подбурам на склоне (рис. 6В) и далее к подбурам глеевым в низине (рис. 6С). Соответственно наблюдается переход горизонта ВС к ВСг. Следы оглеения проявляются в виде сизых и ржавых пятен, прожилок и примазок. Расстояние между записями составляло 30 м, а превышение высот – порядка 5 м.

Первым признаком изменения влажности служит разность времен регистрации известных горизонтов, что связано с изменением скорости электромагнитной волны. Данный факт подтверждается детальными промерами относительной диэлектрической проницаемости. В случае малого увлажнения для горизонта А0 и

A1B $\varepsilon_{cp} = 9.7$ ($V = 9.6$ см/нс), а для BC $\varepsilon_{cp} = 4.4$ ($V = 14$ см/нс). Переходная зона характеризуется A0 и A1B $\varepsilon_{cp} = 8.9$ ($V = 10.0$ см/нс), а для BC $\varepsilon_{cp} = 9.3$ ($V = 9.3$ см/нс). При избыточном увлажнении для горизонта A0 и A1B $\varepsilon_{cp} = 11.2$ ($V = 9.0$ см/нс), тогда как для горизонта BCg картина резко меняется, происходит градиентный рост ε до 19 условных единиц ($V = 6.8$ см/нс).

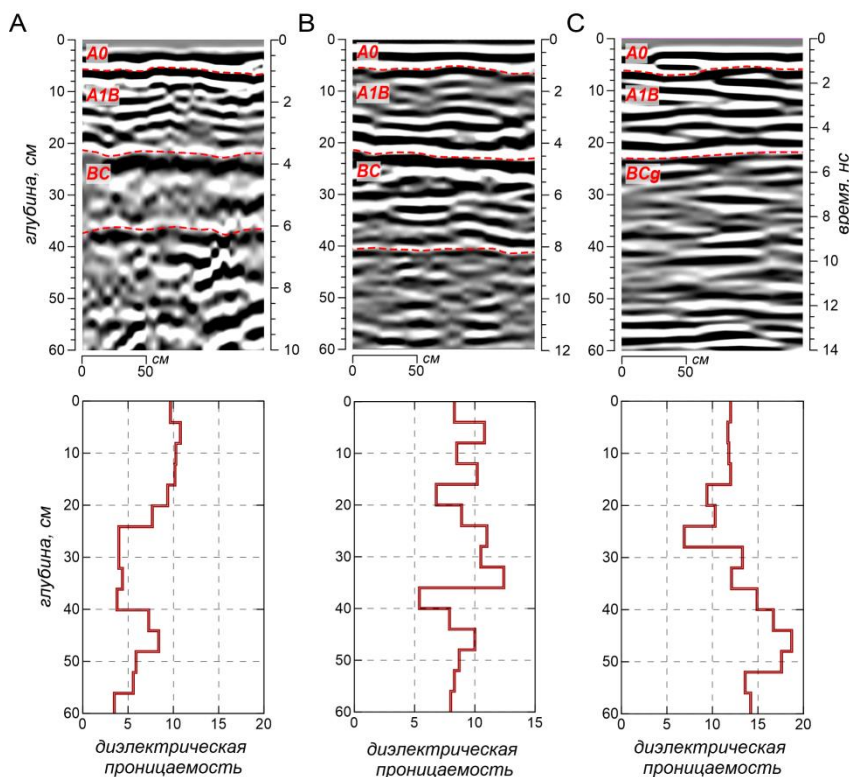


Рис. 6. Фрагменты радарограмм и графики вариации относительной диэлектрической проницаемости для участков автоморфных (А), переходных (В) и полугидроморфных (С) почв.

Fig. 6. Fragments of a GPR profiles and graphs of variations in dielectric constant for sections of automorphic (A), transition (B) and semihydromorphic (C) soils.

Таким образом, можно фиксировать постепенное падение скорости волны от профиля к профилю, что свидетельствует о постепенном увеличении влажности к подножью возвышенности. Можно проследить, как подошва горизонта ВС, четко регистрируемая на первой записи, ослабевает на второй и становится слабо читаемой на последней радарограмме при переходе к ВСг. Кроме того, если для подбуров подстилающая шунгитовая морена имеет хаотическую волновую картину, то для глеевых подбуров подошва горизонта ВСг не определяется, а нижележащие не идентифицированные слои имеют параллельные оси синфазности.

Практические примеры показывают возможность определения границ почвенных горизонтов и их прослеживание на значительные расстояния. Получаемая точность наблюдений позволяет оценить пространственную структуру почвенного профиля и выявить участки аномальных изменений. Важным фактором для успешного применения метода георадиолокации является привлечение прямых почвенных наблюдений, что позволяет разработать опорную интерпретационную схему. Так как изучение почв для методов геофизики является крайне сложной задачей с неоднозначным решением, отсутствие подобных данных ограничивает спектр исследований и переводит получаемые результаты в статус оценочных и, зачастую, умозрительных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ продемонстрировал, что метод георадиолокации может успешно применяться для решения целого спектра задач почвоведения. Высокая производительность и точность наблюдений позволяет исследовать маломощные почвенные горизонты с разрешением до 2–3 см, оценивать изменения их электрофизических параметров в горизонтальной проекции и на глубину, а также выполнять поиск и учет локальных неоднородностей. На примере подбуров Заонежского полуострова показана возможность для прослеживания мощности почвенных горизонтов с привлечением опорных почвенных разрезов георадаром с антенной частотой 400 МГц. Непрерывная георадиолокационная съемка обеспечила обследование значительной площади, позволила получить схему мощности почвенного покрова и выявить области из-

менения толщины. Получаемые модельные разрезы и карты можно сопоставлять с данными о ландшафтах и биоценозах для выявления наиболее значимых факторов почвообразования. Дальнейшее развитие метода георадиолокации и его адаптация к специфике задач почвоведения зависит от способов комплексного использования данных и интегрирования геофизических и почвенных методов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахмет О.Н.* Остров Кизи. Литогенные почвы, сформировавшиеся на шунгитовых сланцах. Путеводитель почвенной экскурсии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 44 с.
2. *Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С., Родионова О.В.* Определение влажности образцов почв диэлектрическим методом // Почвоведение. 2019. №. 7. С. 859–871. DOI: [10.1134/S0032180X19050034](https://doi.org/10.1134/S0032180X19050034).
3. *Владов М.Л., Судакова М.С.* Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
4. *Морозова Р.М., Федорец Н.Г., Бахмет О.Н.* Почвы и почвенный покров Заонежья Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2004. Вып. 6. С. 69–89.
5. *Поздняков А.И.* Полевая электрофизика почв. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 187 с.
6. Разнообразие почв и биоразнообразие в лесных экосистемах средней тайги / Отв. редактор *Н.Г. Федорец*. М.: Наука, 2006. 287 с.
7. *Рязанцев П.А., Бахмет О.Н.* Использование электроразведочных методов для картирования почвенных неоднородностей // Почвоведение. 2020. №. 5. С. 535–546. DOI: [10.31857/S0032180X20050123](https://doi.org/10.31857/S0032180X20050123).
8. *Старовойтов А.В.* Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 191 с.
9. *Чудинова С.М.* Диэлектрические показатели почвы и категории почвенной влаги // Почвоведение. 2009. №. 4. С. 441–451.
10. *Afshar F.A., Ayoubi S., Castrignanò A., Quarto R., Ardekani M.R.M.* Using ground-penetrating radar to explore the cemented soil horizon in an arid region in Iran // Near Surface Geophysics. 2017. Vol. 15. No. 1. P. 103–110. DOI: [10.3997/1873-0604.2016049](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016049).
11. *al Hagrey S.A., Müller C.* GPR study of pore water content and salinity in sand // Geophysical Prospecting. 2000. Vol. 48. No. 1. P. 63–85. DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x).

12. Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R. (Eds.) Handbook of Agricultural Geophysics. Boca Raton: CRC Press, 2008. 432 p. DOI: [10.1201/9781420019353](https://doi.org/10.1201/9781420019353).
13. Allred B.J., Freeland R.S., Farahani H.J., Collins M.E. Agricultural geophysics: past, present, and future // 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2010. P. 190–202. DOI: [10.4133/1.3445432](https://doi.org/10.4133/1.3445432)
14. Allred B.J. A GPR agricultural drainage pipe detection case study: Effects of antenna orientation relative to drainage pipe directional trend // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. 2013. Vol. 18. No. 1. P. 55–69. DOI: [10.2113/JEEG18.1.55](https://doi.org/10.2113/JEEG18.1.55).
15. André F., Jonard F., Jonard M., Lambot S. In situ characterization of forest litter using ground-penetrating radar // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2016. Vol. 121. No. 3. P. 879–894. DOI: [10.1002/2015JG002952](https://doi.org/10.1002/2015JG002952).
16. Annan A.P. Ground penetrating radar principles, procedures and applications. Mississauga: Sensors&Software, 2003. 278 p.
17. Ardekani M.R.M. Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping // Geoderma. 2013. Vol. 200–201. P. 55–66. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010).
18. Bechtel T., Truskavetsky S., Pochanin G., Capineri L., Sherstyuk A., Viatkin K., Byndych T., Ruban V., Varyanitzha-Roschupkina L., Orlenko O., Kholod P., Falorni P., Bulletti A., Bossi L., Crawford F. Characterization of electromagnetic properties of in situ soils for the design of landmine detection sensors: Application in Donbass, Ukraine // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. No. 1232. P. 1–16. DOI: [10.3390/rs11101232](https://doi.org/10.3390/rs11101232).
19. Boll J., van Rijn R.P.G., Weiler K.W., Ewen J.A., Daliparthi J., Herbert S.J., Steenhuis T.S. Using ground-penetrating radar to detect layers in a sandy field soil // Geoderma. 1996. Vol. 70. No. 2–4. P. 117–132. DOI: [10.1016/0016-7061\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00077-1).
20. Borden K.A., Thomas S.C., Isaac M.E. Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar // Plant Soil. 2017. Vol. 410. P. 323–334. DOI: [10.1007/s11104-016-3015-x](https://doi.org/10.1007/s11104-016-3015-x).
21. Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // Tree Physiology. 2001. Vol. 21. No. 17. P. 1269–1278. DOI: [10.1093/treephys/21.17.1269](https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269).
22. Butnor J.R., Campbell J.L., Shanley J.B., Zarnoch S.J. Measuring soil frost depth in forest ecosystems with ground penetrating radar // Agricultural and

Forest Meteorology. 2014. Vol. 192–193. P. 121–131. DOI: [10.1007/s11104-015-2768-y](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2768-y).

23. *Cassidy N.J.* Evaluating LNAPL contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurements: Practical implications for hydrological studies // Journal of Contaminant Hydrology. 2007. Vol. 94. No. 1–2. P. 49–75. DOI: [10.1016/j.jconhyd.2007.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.05.002).

24. *Collins M.E., Doolittle J.A.* Using ground-penetrating radar to study soil microvariability // Soil Science Society of America Journal. 1987. Vol. 51. No. 2. P. 491–493. DOI: [10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x](https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x).

25. *Daniels J.J., Roberts R., Vendl M.* Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants // Journal of Applied Geophysics. 1995. Vol. 33. No. 1–3. P. 195–207. DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90041-1).

26. *De Benedetto D., Montemurro F., Diacono M.* Mapping an agricultural field experiment by electromagnetic Induction and ground penetrating radar to improve soil water content estimation // Agronomy. 2019. Vol. 9. No. 638. P. 1–16. DOI: [10.3390/agronomy9100638](https://doi.org/10.3390/agronomy9100638).

27. *Doolittle J.A., Collins M.E.* Use of soil information to determine application of ground penetrating radar // Journal of Applied Geophysics. 1995. Vol. 33. No. 1–3. P. 101–108. DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90033-0)

28. *Doolittle J.A., Minzenmayer F.E., Waltman S.W., Benham E.C., Tuttle J.W., Peaslee S.D.* Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States // Geoderma. 2007. Vol. 141. No. 3–4. P. 416–421. DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.05.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.015).

29. *Doolittle J.A., Butnor J.R.* Soils, peatlands, and biomonitoring // Ground penetrating radar. Theory and Applications. 2009. P. 179–202. DOI: [10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5).

30. *Doolittle J., Dobos R., Peaslee S., Waltman S., Benham E., Tuttle W.* Revised ground-penetrating radar soil suitability maps // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2010. Vol. 15. No. 3. P. 111–118. DOI: [10.2113/JEEG15.3.111](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.111).

31. *Doolittle J.A., Brevik E.C.* The use of electromagnetic induction techniques in soils studies // Geoderma. 2014. Vol. 223–225. P. 33–45. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027).

32. *Grote K., Anger C., Kelly B., Hubbard S., Rubin Y.* Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR ground wave techniques // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2010. Vol. 15. No. 3. P. 93–110. DOI: [10.2113/JEEG15.3.93](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.93).

33. *Guo L., Chen J., Cui X.H., Fan B.H., Lin H.* Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review // Plant and Soil. 2013. Vol. 362. P. 1–23. DOI: [10.1007/s11104-012-1455-5](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5).

34. *Hruška J., Čermák J., Sustek S.* Mapping tree root systems with ground-penetrating radar // *Tree Physiology*. 1999. Vol. 19. P. 125–130. DOI: [10.1093/treephys/19.2.125](https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125).
35. *Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P.* Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review // *Vadose Zone Journal*. 2003. Vol. 2. No. 4. P. 476–491. DOI: [10.2136/vzj2003.4760](https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760).
36. *Igel J.* On the small-scale variability of electrical soil properties and its influence on geophysical measurements: PhD Thesis. Frankfurt am Main, 2007. 173 p.
37. *Ikazaki K., Nagumo F., Simporé S., Barro A.* Soil toposequence, productivity, and a simple technique to detect petroplinthites using ground-penetrating radar in the Sudan Savanna // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2018. Vol. 64. No. 5. P. 623–631. DOI: [10.1080/00380768.2018.1502604](https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1502604).
38. *James I.T., Waine T.W., Bradley R.I., Taylor J.C., Godwin R.J.* Determination of Soil Type Boundaries using Electromagnetic Induction Scanning Techniques // *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 86. No. 4. P. 421–430. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001).
39. *Léger E., Dafflon B., Soom F., Peterson J., Ulrich C., Hubbard S.* Quantification of Arctic soil and permafrost properties using ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography datasets // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. Vol. 10. No. 10. P. 4348–4359. DOI: [10.1109/JSTARS.2017.2694447](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2694447).
40. *Liu X., Dong X., Leskovar D.I.* Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review // *International Agrophysics*. 2016. Vol. 30. P. 533–543. DOI: [10.1515/intag-2016-0010](https://doi.org/10.1515/intag-2016-0010).
41. *Lunt I.A., Hubbard S.S., Rubin Y.* Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data // *Journal of Hydrology*. 2005. Vol. 307. No. 1–4. P. 254–269. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.014).
42. *McKee A.M.* The application of ground penetrating radar at the Kanorado locality, northwest Kansas: Master`s Thesis. Lawrence, 2009. 90 p.
43. *Minet J., Bogaert P., Vanclooster M., Lambot S.* Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping // *Journal of Hydrology*. 2012. Vol. 424–425. P. 112–123. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.12.034](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.034).
44. *Pogosyan L., Sedov S., Pi-Puig T., Ryazantsev P., Rodionov A., Yudina A., Krasilnikov P.* Pedogenesis of a Retisol with fragipan in Karelia in the context of the Holocene landscape evolution // *Baltica*. 2018. Vol. 31. No. 2. P. 134–145. DOI: [10.5200/baltica.2018.31.13](https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.13).
45. *Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., Friedman S.P.* A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils

Using Time Domain Reflectometry // *Vadose Zone Journal*. 2003. Vol. 2. P. 444–475. DOI: [10.2113/2.4.444](https://doi.org/10.2113/2.4.444).

46. *Rejšek K., Hruška J., Kuba L., Tichá R., Drobný D., Formánek P., Vranová V.* A methodological contribution to use of Ground-penetrating radar (GPR) as a tool for monitoring contamination of urban soils with road salt // *Urban Ecosystems*. 2015. Vol. 18. P. 169–188. DOI: [10.1007/s11252-014-0391-y](https://doi.org/10.1007/s11252-014-0391-y).

47. *Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richarde G.* Electrical resistivity survey in soil science: a review // *Soil & Tillage Research*. 2005. Vol. 83. P. 173–193. DOI: [10.1016/j.still.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004).

48. *Shih S.F., Myhre D.L.* Ground-penetrating radar for salt-affected soil assessment // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1994. Vol. 120. No. 2. P. 322–333.

49. *Simeoni M.A., Galloway P.D., O'Neil A.J., Gilkes R.J.* A procedure for mapping the depth to the texture contrast horizon of duplex soils in south-western Australia using ground penetrating radar, GPS and kriging // *Australian Journal of Soil Research*. 2009. Vol. 47. P. 613–621. DOI: [10.1071/SR08241](https://doi.org/10.1071/SR08241).

50. *Steelman C.M., Endres A.L., Jones J.P.* High-resolution ground-penetrating radar monitoring of soil moisture dynamics: Field results, interpretation, and comparison with unsaturated flow model // *Water resources research*. 2012. Vol. 48. W09538. P. 1–17. DOI: [10.1029/2011WR011414](https://doi.org/10.1029/2011WR011414).

51. *Steelman C.M., Endres A.L., van der Kruk J.* Field observations of shallow freeze and thaw processes using high-frequency ground-penetrating radar // *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24. P. 2022–2033. DOI: [10.1002/hyp.7688](https://doi.org/10.1002/hyp.7688).

52. *Stover D.B., Day F.P., Butnor J.R., Drake B.G.* Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar // *Ecology*. 2007. Vol. 88. No. 5. P. 1328–1334. DOI: [10.1890/06-0989](https://doi.org/10.1890/06-0989).

53. *Szuch R.P., White J.G., Vepraskas M.J., Doolittle J.A.* Application of ground penetrating radar to aid restoration planning for a drained Carolina bay // *Wetlands*. 2006. Vol. 26. No. 1. P. 205–216.

54. *Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.* Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // *Water Resources Research*. 1980. Vol. 16. P. 574–582.

55. *Tsoflias G.P., Becker M.W.* Ground-penetrating radar response to fracture-fluid salinity: Why lower frequencies are favorable for resolving salinity changes // *Geophysics*. 2008. Vol. 73. No. 5. P. 25–30. DOI: [10.1190/1.2957893](https://doi.org/10.1190/1.2957893).

56. *Weihermüller L., Huisman J.A., Lambot S., Herbst M., Vereecken H.* Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with

- different ground penetrating radar techniques // Journal of Hydrology. 2007. Vol. 340. P. 205–216. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2007.04.013](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.013).
57. Winkelbauer J., Völkel J., Leopold M., Bernt N. Methods of surveying the thickness of humous horizons using ground penetrating radar (GPR): an example from the Garmisch-Partenkirchen area of the Northern Alps // European Journal of Forest Research. 2011. Vol. 130. P. 799–812. DOI: [10.1007/s10342-010-0472-2](https://doi.org/10.1007/s10342-010-0472-2).
58. Zajičová K., Chumana T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review // Geoderma. 2019. Vol. 343. P. 116–129. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024).
59. Zhang J., Lin H., Doolittle J. Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils // Geoderma. 2014. Vol. 213. P. 560–569. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.08.035](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.035)

REFERENCES

1. Bahmet O.N., *Litogennye pochvy, sformirovavshiesya na shungitovykh slantsakh. Putevoditel' pochvennoi ekskursii* (Kizhi island. Lithogenic soils formed on schungite schists. Soil excursion guide), Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2012, 44 p.
2. Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V., *Opreделение vlazhnosti obraztsov pochv dielektricheskim metodom* (Soil moisture measurement by the dielectric method), *Pochvovedenie*, 2019, No. 7, pp. 859–871, DOI: [10.1134/S0032180X19050034](https://doi.org/10.1134/S0032180X19050034).
3. Vladov M.L., Sudakova M.S., *Georadiolokatsiya: ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii* (Ground penetrating radar: from the physical foundations to promising areas), Moscow: GEOS, 2017, 240 p.
4. Morozova R.M., Fedorec N.G., Bahmet O.N., *Pochvy i pochvennyi pokrov Zaonezh'ya Karelii* (Soils and soil cover Zaonezhye Karelia), *Trudy KarNTs RAN*, 2004, Vol. 6, pp. 69–89.
5. Pozdnyakov A.I., *Polevaya elektrofizika pochv* (Field Electrophysics of Soils), Moscow: MAIK “Nauka/Interperiodika”, 2001, 187 p.
6. Fedorec N.G., *Raznoobrazie pochv i bioraznoobrazie v lesnykh ekosistemakh srednei taigi* (Soil diversity and biodiversity in forest ecosystems of the middle taiga), Moscow: Nauka, 2006, 287 p.
7. Ryazancev P.A., Bahmet O.N., *Ispol'zovanie elektrorazvedochnykh metodov dlya kartirovaniya pochvennykh neodnorodnostei* (Application of geoelectric methods for mapping soil heterogeneity), *Pochvovedenie*, 2020, No. 5, pp. 535–546, DOI: [10.31857/S0032180X20050123](https://doi.org/10.31857/S0032180X20050123).
8. Starovojtov A.V., *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh* (Interpretation of GPR data), Moscow: Moscow State University, 2008, 191 p.

9. Chudinova S.M., Dielektricheskie pokazateli pochvy i kategorii pochvennoi vlagi (Dielectric characteristics of soils and categories of soil water), *Pochvovedenie*, 2009, No. 4, pp. 441–451.
10. Afshar F.A., Ayoubi S., Castrignanò A., Quarto R., Ardekani M.R.M., Using ground-penetrating radar to explore the cemented soil horizon in an arid region in Iran, *Near Surface Geophysics*, 2017, Vol. 15, No. 1, pp. 103–110, DOI: [10.3997/1873-0604.2016049](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016049).
11. al Hagrey S.A., Müller C., GPR study of pore water content and salinity in sand, *Geophysical Prospecting*, 2000, Vol. 48, No. 1, pp. 63–85, DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x).
12. Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R. (Eds.), *Handbook of Agricultural Geophysics*, Boca Raton: CRC Press, 2008, 432 p., DOI: [10.1201/9781420019353](https://doi.org/10.1201/9781420019353).
13. Allred B.J., Freeland R.S., Farahani H.J., Collins M.E., Agricultural geophysics: past, present, and future, *23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2010, pp. 190–202, DOI: [10.4133/1.3445432](https://doi.org/10.4133/1.3445432).
14. Allred B.J., A GPR agricultural drainage pipe detection case study: Effects of antenna orientation relative to drainage pipe directional trend, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2013, Vol. 18, No. 1, pp. 55–69, DOI: [10.2113/JEEG18.1.55](https://doi.org/10.2113/JEEG18.1.55).
15. André F., Jonard F., Jonard M., Lambot S., In situ characterization of forest litter using ground-penetrating radar, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, Vol. 121, No. 3, pp. 879–894, DOI: [10.1002/2015JG002952](https://doi.org/10.1002/2015JG002952).
16. Annan A.P., *Ground penetrating radar principles, procedures and applications*, Mississauga: Sensors & Software, 2003, 278 p.
17. Ardekani M.R.M., Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping, *Geoderma*, 2013, Vol. 200–201, pp. 55–66, DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010).
18. Bechtel T., Truskavetsky S., Pochanin G., Capineri L., Sherstyuk A., Viatkin K., Byndych T., Ruban V., Varyanitzia-Roschupkina L., Orlenko O., Khodod P., Falorni P., Bulletti A., Bossi L., Crawford F., Characterization of electromagnetic properties of in situ soils for the design of landmine detection sensors: Application in Donbass, Ukraine, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 1232, pp. 1–16, DOI: [10.3390/rs11101232](https://doi.org/10.3390/rs11101232).
19. Boll J., van Rijn R.P.G., Weiler K.W., Ewen J.A., Daliparthi J., Herbert S.J., Steenhuis T.S., Using ground-penetrating radar to detect layers in a sandy field soil, *Geoderma*, 1996, Vol. 70, No. 2–4, pp. 117–132, DOI: [10.1016/0016-7061\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00077-1).

20. Borden K.A., Thomas S.C., Isaac M.E., Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar, *Plant Soil*, 2017, Vol. 410, pp. 323–334, DOI: [10.1007/s11104-016-3015-x](https://doi.org/10.1007/s11104-016-3015-x).
21. Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H., Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States, *Tree Physiology*, 2001, Vol. 21, No. 17, pp. 1269–1278, DOI: [10.1093/treephys/21.17.1269](https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269).
22. Butnor J.R., Campbell J.L., Shanley J.B., Zarnoch S.J., Measuring soil frost depth in forest ecosystems with ground penetrating radar, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, Vol. 192–193, pp. 121–131, DOI: [10.1007/s11104-015-2768-y](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2768-y).
23. Cassidy N.J., Evaluating LNAPL contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurements: Practical implications for hydrological studies, *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, Vol. 94, No. 1–2, pp. 49–75, DOI: [10.1016/j.jconhyd.2007.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.05.002).
24. Collins M.E., Doolittle J.A., Using ground-penetrating radar to study soil microvariability, *Soil Science Society of America Journal*, 1987, Vol. 51, No. 2, pp. 491–493, DOI: [10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x](https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x).
25. Daniels J.J., Roberts R., Vendl M., Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants, *Journal of Applied Geophysics*, 1995, Vol. 33, No. 1–3, pp. 195–207, DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90041-1).
26. De Benedetto D., Montemurro F., Diacono M., Mapping an agricultural field experiment by electromagnetic Induction and ground penetrating radar to improve soil water content estimation, *Agronomy*, 2019, Vol. 9, No. 638, pp. 1–16, DOI: [10.3390/agronomy9100638](https://doi.org/10.3390/agronomy9100638).
27. Doolittle J.A., Collins M.E., Use of soil information to determine application of ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics*, 1995, Vol. 33, No. 1–3, pp. 101–108, DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90033-0).
28. Doolittle J.A., Minzenmayer F.E., Waltman S.W., Benham E.C., Tuttle J.W., Peaslee S.D., Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States, *Geoderma*, 2007, Vol. 141, No. 3–4, pp. 416–421, DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.05.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.015).
29. Doolittle J.A., Butnor J.R., Soils, peatlands, and biomonitoring, In: *Ground penetrating radar. Theory and applications*, 2009, pp. 179–202, DOI: [10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5).
30. Doolittle J., Dobos R., Peaslee S., Waltman S., Benham E., Tuttle W., Revised ground-penetrating radar soil suitability maps, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2010, Vol. 15, No. 3, pp. 111–118, DOI: [10.2113/JEEG15.3.111](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.111).

31. Doolittle J.A., Brevik E.C., The use of electromagnetic induction techniques in soils studies, *Geoderma*, 2014, Vol. 223–225, pp. 33–45, DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027).
32. Grote K., Anger C., Kelly B., Hubbard S., Rubin Y., Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR ground wave techniques, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2010, Vol. 15, No. 3, pp. 93–110, DOI: [10.2113/JEEG15.3.93](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.93).
33. Guo L., Chen J., Cui X.H., Fan B.H., Lin H., Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review, *Plant and Soil*, 2013, Vol. 362, pp. 1–23, DOI: [10.1007/s11104-012-1455-5](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5).
34. Hruška J., Čermák J., Sustek S., Mapping tree root systems with ground-penetrating radar, *Tree Physiology*, 1999, Vol. 19, pp. 125–130, DOI: [10.1093/treephys/19.2.125](https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125).
35. Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P., Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review, *Vadose Zone Journal*, 2003, Vol. 2, No. 4, pp. 476–491, DOI: [10.2136/vzj2003.4760](https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760).
36. Igel J., *On the small-scale variability of electrical soil properties and its influence on geophysical measurements: PhD Thesis*. Frankfurt am Main, 2007, 173 p.
37. Ikazaki K., Nagumo F., Simporé S., Barro A., Soil toposequence, productivity, and a simple technique to detect petroplinthites using ground-penetrating radar in the Sudan Savanna, *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, Vol. 64, No. 5, pp. 623–631, DOI: [10.1080/00380768.2018.1502604](https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1502604).
38. James I.T., Waive T.W., Bradley R.I., Taylor J.C., Godwin R.J., Determination of Soil Type Boundaries using Electromagnetic Induction Scanning Techniques, *Biosystems Engineering*, 2003, Vol. 86, No. 4, pp. 421–430, DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001).
39. Léger E., Dafflon B., Soom F., Peterson J., Ulrich C., Hubbard S., Quantification of Arctic soil and permafrost properties using ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography datasets, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 10, pp. 4348–4359, DOI: [10.1109/JSTARS.2017.2694447](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2694447).
40. Liu X., Dong X., Leskovar D.I., Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review, *International Agrophysics*, 2016, Vol. 30, pp. 533–543, DOI: [10.1515/intag-2016-0010](https://doi.org/10.1515/intag-2016-0010).
41. Lunt I.A., Hubbard S.S., Rubin Y., Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data, *Journal of Hydrology*, 2005, Vol. 307, No. 1–4, pp. 254–269, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.014).
42. McKee A.M., *The application of ground penetrating radar at the Kanorado locality, northwest Kansas: Master`s Thesis*, Lawrence, 2009, 90 p.

43. Minet J., Bogaert P., Vanclooster M., Lambot S., Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping, *Journal of Hydrology*, 2012, Vol. 424–425, pp. 112–123, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.12.034](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.034).
44. Pogosyan L., Sedov S., Pi-Puig T., Ryazantsev P., Rodionov A., Yudina A., Krasilnikov P., Pedogenesis of a retisol with fragipan in Karelia in the context of the Holocene landscape evolution, *Baltica*, 2018, Vol. 31, No. 2, pp. 134–145, DOI: [10.5200/baltica.2018.31.13](https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.13).
45. Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., Friedman S.P., A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using Time domain reflectometry, *Vadose Zone Journal*, 2003, Vol. 2, pp. 444–475, DOI: [10.2113/2.4.444](https://doi.org/10.2113/2.4.444).
46. Rejšek K., Hruška J., Kuba L., Tichá R., Drobný D., Formánek P., Vranová V., A methodological contribution to use of Ground-penetrating radar (GPR) as a tool for monitoring contamination of urban soils with road salt, *Urban Ecosystems*, 2015, Vol. 18, pp. 169–188, DOI: [10.1007/s11252-014-0391-y](https://doi.org/10.1007/s11252-014-0391-y).
47. Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richarde G., Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil & Tillage Research*, 2005, Vol. 83, pp. 173–193, DOI: [10.1016/j.still.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004).
48. Shih S.F., Myhre D.L., Ground-penetrating radar for salt-affected soil assessment, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1994, Vol. 120, No. 2, pp. 322–333.
49. Simeoni M.A., Galloway P.D., O’Neil A.J., Gilkes R.J., A procedure for mapping the depth to the texture contrast horizon of duplex soils in south-western Australia using ground penetrating radar, GPS and kriging, *Australian Journal of Soil Research*, 2009, Vol. 47, pp. 613–621, DOI: [10.1071/SR08241](https://doi.org/10.1071/SR08241).
50. Steelman C.M., Endres A.L., Jones J.P., High-resolution ground-penetrating radar monitoring of soil moisture dynamics: Field results, interpretation, and comparison with unsaturated flow model, *Water resources research*, 2012, Vol. 48, W09538, pp. 1–17, DOI: [10.1029/2011WR011414](https://doi.org/10.1029/2011WR011414).
51. Steelman C.M., Endres A.L., van der Kruk J., Field observations of shallow freeze and thaw processes using high-frequency ground-penetrating radar, *Hydrological Processes*, 2010, Vol. 24, pp. 2022–2033, DOI: [10.1002/hyp.7688](https://doi.org/10.1002/hyp.7688).
52. Stover D.B., Day F.P., Butnor J.R., Drake B.G., Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar, *Ecology*, 2007, Vol. 88, No. 5, pp. 1328–1334, DOI: [10.1890/06-0989](https://doi.org/10.1890/06-0989).

53. Szuch R.P., White J.G., Vepraskas M.J., Doolittle J.A., Application of ground penetrating radar to aid restoration planning for a drained Carolina bay, *Wetlands*, 2006, Vol. 26, No. 1, pp. 205–216.
54. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 1980, Vol. 16, pp. 574–582.
55. Tsoflias G.P., Becker M.W., Ground-penetrating radar response to fracture-fluid salinity: Why lower frequencies are favorable for resolving salinity changes, *Geophysics*, 2008, Vol. 73, No. 5, pp. 25–30, DOI: [10.1190/1.2957893](https://doi.org/10.1190/1.2957893).
56. Weihermüller L., Huisman J.A., Lambot S., Herbst M., Vereecken H., Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques, *Journal of Hydrology*, 2007, Vol. 340, pp. 205–216, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2007.04.013](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.013).
57. Winkelbauer J., Völkel J., Leopold M., Bernt N., Methods of surveying the thickness of humous horizons using ground penetrating radar (GPR): an example from the Garmisch-Partenkirchen area of the Northern Alps, *European Journal of Forest Research*, 2011, Vol. 130, pp. 799–812, DOI: [10.1007/s10342-010-0472-2](https://doi.org/10.1007/s10342-010-0472-2).
58. Zajícová K., Chumana T., Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review, *Geoderma*, 2019, Vol. 343, pp. 116–129, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024).
59. Zhang J., Lin H., Doolittle J., Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils, *Geoderma*, 2014, Vol. 213, pp. 560–569, DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.08.035](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.035).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-91-108



Ссылки для цитирования:

Шопина О.В., Семенов И.Н., Парамонова Т.А., Комиссарова О.Л. Баланс элементов в системе “агрочернозем глинисто-иллювиальный – сельскохозяйственные растения” на Плавском плато (Тульская область России) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 91-108. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-91-108

Cite this article as:

Shopina O.V., Semenov I.N., Paramonova T.A., Komissarova O.L., The balance of elements in the system “Luvic Chernozems – agricultural plants” on the Plavsk upland (Tula region of Russia), Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 91-108, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-91-108

Благодарность:

Полевые работы выполнены в рамках исследований кафедры радиэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова “Биогеохимия радионуклидов и экотоксикантов”. Элементный состав растений и содержание подвижных форм в почвах определены в рамках проекта РНФ № 17-77-20072.

Acknowledgments:

Field work was carried out as a part of research by the Department of Radioecology and Ecotoxicology, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, “Biogeochemistry of Radionuclides and Ecotoxics”. The elemental composition of plants and the content of mobile forms in soils were determined in the framework of the project No. 17-77-20072 of the Russian Science Foundation.

**¹Баланс элементов в системе
“агрочернозем глинисто-иллювиальный –
сельскохозяйственные растения” на Плавском
плато (Тульская область России)**

© 2020 г. О. В. Шопина^{*}, И. Н. Семенов^{**},
Т. А. Парамонова^{***}, О. Л. Комиссарова^{****}

¹ Статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

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

* <https://orcid.org/0000-0001-7094-7230>, e-mail: olashopina@gmail.com,

** <https://orcid.org/0000-0003-4309-2809>, e-mail: semenkov@geogr.msu.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>,

e-mail: tparamono-va@soil.msu.ru,

**** <https://orcid.org/0000-0002-0511-2269>,

e-mail: komissarova-olga93@yandex.ru.

Поступила в редакцию 14.05.2020, после доработки 15.11.2020,
принята к публикации 17.12.2020

Резюме: На территории Плавского плато (Тульская область), подверженного интенсивному воздействию промышленности (в 40 км находится г. Щекино с заводом по производству азотных удобрений и ТЭЦ, в 60 км – г. Тула с крупными металлургическими предприятиями, в 70 км – г. Новомосковск с несколькими химическими предприятиями и ГРЭС) и сельского хозяйства, исследованы запасы химических элементов в трех агроценозах (пшеницы, сои, козлятниково-кострецовой травосмеси) для оценки интенсивности перехода элементов (K, P, S, Mg, Ca, Si, Na, Fe, Al, Mn, Zn, Ba, Cu, Sr, Ti, Mo, As, Zr, Pb, Co, Ni, V, Cr) из агрочерноземов глинисто-иллювиальных в сельскохозяйственные растения. Валовое содержание элементов в почвах определено рентген-флуоресцентным методом. Элементный состав растений (после автоклавного разложения смесью концентрированных азотной кислоты и перекиси водорода) и содержание подвижных форм (извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с pH 4.8) элементов в почве оценено атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой. Общие запасы элементов в 10-сантиметровом слое почв максимальны для Si (40 ± 4 кг/м²), Al (7.0 ± 0.8 кг/м²) и Fe (3.4 ± 0.3 кг/м²), подвижных форм – для Ca (570 ± 48 г/м²), Mg (43 ± 4 г/м²), K (22 ± 6 г/м²). В растениях основные запасы (г/м²) элементов (K, P, S, Mg, Si, Mn, Zn, Ba, Cu, Mo) сконцентрированы в надземной части. Наиболее активно растения поглощают подвижные формы K, P, Ti, Mo, As, Zr, V. На основе ресурсного метода оценки качества почв изученные агрочерноземы характеризуются низким уровнем загрязнения Ni, умеренным запасом подвижных форм K при недостатке подвижного P.

Ключевые слова: биогеохимия, загрязнение почв, потенциально токсичные элементы, тяжелые металлы и металлоиды, качество сельскохозяйственной продукции, биологическое поглощение, Среднерусская возвышенность.

²The balance of elements in the system “Luvic Chernozems – agricultural plants” on the Plavsk upland (Tula region of Russia)

O. V. Shopina^{*}, I. N. Semenov^{**},
T. A. Paramonova^{***}, O. L. Komissarova^{****}

Lomonosov Moscow State University,

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

^{*}<https://orcid.org/0000-0001-7094-7230>, e-mail: olashopina@gmail.com,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-4309-2809>, e-mail: semenkov@geogr.msu.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>,

e-mail: tparamono-va@soil.msu.ru,

^{****}<https://orcid.org/0000-0002-0511-2269>,

e-mail: komissarova-olga93@yandex.ru.

Received 14.05.2020, Revised 15.11.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: To assess the transfer of macro (K, P, S, Mg, Ca, as well as Si, Na, Fe, Al, Mn and Ti) and microelements (Zn, Ba, Cu, Sr, Mo, as well as As, Zr, Pb, Co, Ni, V and Cr) from Luvic Chernozems (Aric, Loamic, Pachic) into agricultural plants, we studied the inventories of chemical elements in three agrocenoses (wheat, soybean, *Galega orientalis* Lam. and *Bromopsis inermis* Leyss grass mixtures) from the Plavsk upland (Tula Region). This territory is subjected to intensive industrial and agricultural impacts: it is 40 km away from the town of Shchekino with a nitrogen fertilizer plant and a thermal power plant, 60 km away from Tula with large metallurgical enterprises, 70 km away from the town of Novomoskovsk with several chemical enterprises and state district power plant. In soils, the total content of elements was determined by the X-ray fluorescence spectrometry. The elemental composition of plants after autoclave decomposition with a mixture of concentrated nitric acid and hydrogen peroxide and the content of the bioavailable fraction (extracted by an ammonium acetate buffer with pH 4.8) of elements in soil were estimated by the atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. In topsoil (a 10-cm layer), maximal inventories are typical for total Si (40 ± 4 kg/m²), Al (7.0 ± 0.8 kg/m²) and Fe (3.4 ± 0.3 kg/m²) and for bioavailable Ca (570 ± 48 g/m²), Mg (43 ± 4 g/m²), K (22 ± 6

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

g/m²). In plants, the main inventories (g/m²) of K, P, S, Mg, Si, Mn, Zn, Ba, Cu, Mo occur in the above ground phytomass. The most effectively plants assimilate bioavailable fractions of K, P, Ti, Mo, As, Zr, V. Based on the resource method for soil quality assessment, the studied Chernozems are characterized by a low level of Ni contamination, a moderate supply of bioavailable K with a lack of bioavailable P.

Keywords: biogeochemistry, soil pollution, potentially toxic elements, heavy metals and metalloids, quality of agricultural products, biological absorption, Central Russian Upland.

ВВЕДЕНИЕ

На дифференцированной оценке запасов загрязняющих и потенциально полезных веществ в почвах основан ресурсный подход к оценке их качества ([Смагин и др., 2008](#)). В пахотные почвы поллютанты поступают в составе аэрогенных выпадений, а также за счет прямого внесения агрохимикатов и мелиорантов. В условиях нарастающего антропогенного прессинга необходимо четко знать биогеохимическую специализацию культурных растений, чтобы снизить риск получения некачественной сельскохозяйственной продукции ([Ильин, 1973](#)). Интенсивность поглощения химических элементов (ХЭ) растениями из почв определяется множеством факторов: концентрацией и формами нахождения в почве, pH, Eh, содержанием органического вещества ($C_{орг}$), биогенных конкурирующих ХЭ и элементов питания (N, P, K) и др. ([Баргальи, 2005](#)).

Тульская область остается важным производителем промышленной и аграрной продукции в Центральной России, что определяет поступление разнообразных поллютантов в связи с высокой концентрацией предприятий химической, металлургической промышленности и применением минеральных удобрений и гербицидов ([Арляпов и др., 2015](#)). Содержание тяжелых металлов в культурных растениях, выращиваемых на загрязненных территориях, стало предметом многих исследований ([Wang et al., 2020](#); [Zhang et al., 2019](#); [Liu et al., 2014](#)). Исследования запасов элементов в почвах и растениях ([Сулейманов, Низамов, 2015](#); [Рамазанова, Ахмедова, 2010](#); [Overesch et al., 2007](#)) встречаются намного реже и до настоящего момента не проводились на терри-

тории Тульской области.

Целью настоящей работы является оценка интенсивности геохимических потоков ХЭ из агрочерноземных почв в сельскохозяйственные растения, произрастающие на территории одного из наиболее возвышенных участков Среднерусской возвышенности – Плавском плато.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для изучения общих объемов годичного потребления и перераспределения ХЭ по органам растений семейств Злаковые и Бобовые на территории Плавского плато (южная часть Тульской области) было исследовано три площадки с агрочерноземами глинисто-иллювиальными (Luvic Chernozems (Aric, Loamic, Pachic)) под агроценозами пшеницы (*Triticum aestivum* L.), сои (*Glycine max* L.) и козлятниково-кострецовой (*Galega orientalis* Lam. и *Bromopsis inermis* Leyss.) травосмеси с отбором 16 образцов надземной фитомассы и 4 – подземной (рис. 1). Почвенные образцы (совместно с подземной фитомассой) отбирали монолитами ненарушенного сложения с помощью кольцевого пробоотборника с площади 300 см² послойно с шагом по 10 см до глубины 30 см в трехкратной повторности (всего 27 образцов). Надземная растительность опробована методом сплошного укоса с площади 2 500 см² в трехкратной повторности над местом отбора почв. Листья со стеблями и зерно анализировались отдельно. Растения отмывали от почвенного мелкозема под проточной водой до полного осветления промывных вод на системе сит с ячейками 1 и 0.5 мм. Качество отмывки корней контролировали с помощью оптической микроскопии при 10-кратном увеличении. Растения высушивали при комнатной температуре и измельчали для дальнейших химических анализов.

В почвах определяли рН водной вытяжки потенциометрически (прибор “Эксперт-01”, Россия), $S_{орг}$ – титриметрически по И.В. Тюрину с фенилантраниловой кислотой ([Аринушкина, 1970](#)), гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии (прибор “Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus”, Германия), элементный состав – рентген-флуоресцентным методом (прибор “Спектроскан Макс-GV”, Россия) и содержание подвижных форм ХЭ в

вытяжке ацетатно-аммонийного буфера с pH 4.8 – атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой (приборы “iCAP-6500” фирмы “Thermo Scientific” и “X-7” – “Thermo Elemental”, США). Анализ элементного состава растений также проводился атомно-эмиссионным методом на тех же приборах после автоклавного разложения растительных образцов смесью концентрированных HNO_3 и H_2O_2 .



Рис. 1. Район исследований.
Fig. 1. Sampling Area.

Обработка данных включала определение запасов ХЭ в 30-сантиметровом слое почв (общая концентрация/концентрация подвижных форм $\times$ плотность почвы $\times$ площадь $\times$ мощность слоя) и в растениях по органам (концентрация в органе $\times$ запас фитомассы), расчет коэффициента относительного содержания в органе

растения (ОСОР) ($\frac{\text{концентрация ХЭ в органе}}{\text{концентрация ХЭ в корнях}}$) ([Ковалевский, 1969](#)) и коэффициента использования элемента растениями из почв ($\frac{\text{запас ХЭ в растении}}{\text{запас подвижных форм в почве}}$) ([Радов и др., 1971](#)). Также рассчитана доля отчуждения ХЭ из почвы ($\frac{\text{запас ХЭ в наземной части}}{\text{общий запас ХЭ в растении}}$) ([Рамазанова, Ахмедова, 2010](#)). Для оценки значимости различий среднего независимых переменных проводился тест Манна – Уитни в пакете STATISTICA 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства почв. Все изучаемые площадки в агроценозах опробованных культур расположены в схожих условиях (транс-) элювиальных ландшафтов и по физико-химическим свойствам почв значимо не отличаются ([Шопина и др., 2020](#)): рН верхних горизонтов – 6.3 ± 0.4 ($n = 14$), $S_{\text{орг}}$ – 4.6 ± 0.8 ($n = 27$), в гранулометрическом составе преобладают пылеватые фракции: крупная ($44 \pm 4\%$, $n = 27$), мелкая ($25 \pm 4\%$) и средняя ($15 \pm 3\%$) при подчиненной роли песчаных ($4 \pm 4\%$) и илистой ($6 \pm 3\%$).

Общие запасы ХЭ в почвах. Элементный состав верхних 30 см почвы изученных площадок значимо не отличается. Наиболее высокие значения запасов в почве характерны для Si ($40 \pm 4 \text{ кг/м}^2$, для 10-сантиметрового слоя), затем идут Al и Fe с 7.0 ± 0.8 и $3.4 \pm 0.3 \text{ кг/м}^2$ соответственно. Высокие содержания этих ХЭ связаны с их конституционной ролью в минеральной матрице почв. Запасы биогенных K, P, Mg и Ca в изученных черноземах также значительны. Минимальны запасы микроэлементов – As, Pb, Co, Ni (табл. 1).

Нормативы общих запасов ХЭ, разработанные Смагиным с соавторами ([Смагин и др., 2008](#)) на основе значений допустимых концентраций, по Pb, Zn, Cu, As не превышены, а запасы Ni ($> 90 \text{ г/м}^2$ в метровом слое) соответствуют слабой степени загрязнения почв. Вероятными причинами повышенного содержания Ni в почвах может быть принос с удобрениями и аэрогенное поступление с выбросами промышленности и транспорта.

Таблица 1. Общие запасы и запасы подвижных форм ХЭ по глубинам (в см) гумусового горизонта черноземов Плавского плато, изученных на трех площадках, г/м²

Table 1. Total and bioavailable inventories of chemical elements in Chernozem topsoils (cm) studied on 3 sampling areas at the Plavsk upland

ХЭ	Пшеница			Соя			Травосмесь		
	0–10	10–20	20–30	0–10	10–20	20–30	0–10	10–20	20–30
K*	2.3/25	2.6/33	2.5/26	2.3/17	2.5/24	2.4/25	1.8/22	2.3/16	2.1/13
P*	0.12/2.2	0.14/2.5	0.13/2.4	0.09/1.7	0.11/1.8	0.1/2	0.09/2.2	0.1/1.3	0.1/1.6
S*	-1.4	-1.6	-1.3	-1.2	-1.1	-1.4	-1.3	-1	-0.9
Mg*	0.56/42	0.64/50	0.61/44	0.58/39	0.65/45	0.65/43	0.49/45	0.62/42	0.58/36
Ca*	1.1/495	1.2/583	1.2/517	1.1/564	1.2/630	1.3/590	1.1/529	1.3/632	1.2/595
Si*	41/6.0	46/6.7	44/6.0	39/10	44/13	41/12	32/9.2	40/11	38/10
Na*	-2.3	-3.1	-2.1	-2.9	-3.4	-3.5	-2.6	-3.1	-1.7
Fe*	3.4/1.2	3.9/1.5	3.7/1.6	3.5/0.87	4/0.41	3.6/0.46	2.8/0.27	3.4/0.45	3.3/0.49
Al*	7.1/9.1	8/11	7.8/10	7.3/5.6	8.4/3.5	7.8/3.8	5.7/2.2	7.3/3.6	7/4.1
Mn	91/10	104/12	99/11	85/7.6	97/5.2	90/6.1	73/9.0	84/6.7	84/6.5
Zn	9.9/0.34	11/0.31	11/0.26	11/0.26	13/0.25	10/0.31	7.9/0.09	9.2/0.05	9.1/0.17
Ba	-5.4	-6.3	-5.69	-5.0	-5.2	-5.1	-3.9	-5.1	-4.9
Cu	7.1/0.01	7.7/0.01	7.7/0.01	7.8/0.01	9.2/0.01	7.5/0.01	5.7/0.01	7.1/0.01	7/0.01
Sr	19/3.3	21/3.8	20/3.4	17/2.8	19/2.5	18/2.4	15/2.3	17/2.5	17/2.8
Ti	632/ 0.06	715/ <0.05	689/ <0.05	657/ <0.05	752/ <0.05	669/ <0.05	520/ <0.05	636/ <0.05	614/ <0.05
As	0.80/ <0.1	0.88/ <0.1	0.85/ <0.1	0.89/ <0.1	1.11/ <0.1	0.81/ <0.1	0.66/ <0.1	0.73/ <0.1	0.68/ <0.1
Pb	2/<0.01	1.9/<0.01	1.8/<0.01	2.6/<0.01	3.3/<0.01	1.9/<0.01	1.5/<0.01	1.3/<0.01	1.4/<0.01
Co	3.6/0.03	4/0.03	4/0.03	3.8/0.02	4.4/0.03	3.9/0.02	2.8/0.01	3.6/<0.01	3.6/<0.01
Ni	8.2/0.09	8.8/0.1	8.8/0.1	8.2/0.07	9.3/0.07	8.6/0.06	6.8/0.04	8.0/0.06	8.0/0.06
V	14/<0.01	15/<0.01	15/<0.01	14/<0.01	16/<0.01	15/<0.01	11/<0.01	14/<0.01	13/<0.01
Cr	12/0.03	13/0.04	13/0.06	12/0.05	13/0.04	13/0.04	9/0.02	12/0.03	11/0.02

Примечание. Числитель – общие запасы, знаменатель – запасы подвижных форм; * – в кг/м² для общих запасов; “-” – не определялся.

Запасы подвижных форм ХЭ в почвах. По содержанию подвижных форм ХЭ почвы трех площадок также значительно отличаются между собой.

Запасы подвижных форм элементов образуют ряд: Ca ($570 \pm 48 \text{ г/м}^2$) $\gg$ Mg (43 ± 4) $>$ K (22 ± 6) $\gg$ Zn (0.2 ± 0.1), Ni , (0.07 ± 0.02) $>$ Cr (0.04 ± 0.01), Co (0.02 ± 0.01) $>$ Cu (0.01 ± 0.003) и Pb (0.01 ± 0.001) (см. табл. 1).

По сравнению с запасами элементов в пахотном слое типичных черноземов Оренбургской области, в 20-сантиметровом слое почв Плавского плато общие запасы P были сопоставимы, K , Zn , Ni , Cr содержалось больше, а Cu – меньше ([Ряховский, Ярцев, 2006](#)). Запасы подвижного K превышали данные по 25-сантиметровому слою пахотных серых лесных почв Татарстана ([Судейманов, Низамов, 2015](#)), но запасы подвижного P были в 10 раз меньше в черноземах Плавского плато. По сравнению с аллювиальными почвами долины Эльбы, которые также подвержены большой антропогенной нагрузке ([Overesch et al., 2007](#)), запасы подвижных Cu и Ni были ниже в изученных почвах, Cr – выше, а Zn и Pb – сопоставимы.

Согласно требованиям к качеству почв ([Смагин и др., 2008](#)), для изученных агрочерноземов характерен недостаток подвижного P ($< 160 \text{ г/м}^2$ в метровом слое) и умеренное содержание K ($> 200 \text{ г/м}^2$, но $< 600 \text{ г/м}^2$).

Запасы ХЭ в растениях. В надземной части всех изученных растений максимальны содержания биогенных $\text{P}_{1.5-5}$, K_{2-3} , Zn_{2-4} и $\text{Mg}_{1.5-3}$ (подстрочный индекс – значения ОКОР). В корнях в большей мере накапливаются элементы, не относящиеся к необходимым для растений – $\text{Fe}_{0.1-0.7}$, $\text{Al}_{0.1-0.5}$, $\text{As}_{0.1}$, $\text{V}_{0.1}$, $\text{Cr}_{0.1}$, $\text{Co}_{0.1-0.4}$, $\text{Na}_{0.3-0.6}$, $\text{Zr}_{0.02-0.1}$. В подземных и надземных органах содержание $\text{Cu}_{0.9-1.3}$ и $\text{Ba}_{1-1.5}$ близко. В надземной части Бобовых, кроме перечисленных ХЭ, по безбарьерному типу накапливаются необходимые им Ca_4 , Ni_{2-8} , S_{2-3} и Mn_{3-4} ([Kabata-Pendias, Szteke, 2015](#)). В надземной части Злаковых повышено содержание Si_{2-7} , выполняющего скелетную функцию ([Колесников, 2001](#)).

Во всех изученных культурных растениях в структуре фитомассы преобладает надземная фракция.

Таблица 2. Запасы фитомассы и ХЭ в растениях на сухое вещество Плавского плато, изученных на трех площадках (мг/м²)

Table 2. Phytomass and inventories of chemical elements in plants (mg/m²)

ХЭ	Злаковые					Бобовые				
	Пшеница			Кострец		Соя			Козлятник	
	Зерно	Надземная	Корни	Надземная	Корни	Зерно	Надземная	Корни	Надземная	Корни
Фитомасса*	1816	1270	40	270	121	1724	738	83	290	227
K*	4.9	6.8	0.045	3.4	0.20	2.4	14	0.48	2.3	0.55
P*	4.9	2.1	0.021	0.6	0.1	6.9	2.2	0.1	0.9	0.5
S*	2.2	1.3	0.027	0.23	0.11	3.7	1.2	0.07	0.29	0.12
Mg*	0.16	0.96	0.02	0.26	0.07	4.7	2.9	0.13	1.2	0.32
Ca*	0.72	1.7	0.14	0.73	0.74	7.1	8.7	0.3	4.1	0.95
Si	203	218	3.0	52	3.3	224	15	34	8.6	18.8
Na	180	535	8.8	11	18	43	78	28	45	64
Fe	105	149	25	16	35	97	62	9.4	30	34
Al	78	135	32	11	37	38	49	11.7	24	36
Mn	69	48	1.36	11	4.1	33	21	0.50	16	3.6
Zn	40	20	0.33	3.8	2.2	47	14	0.58	4.8	2.3
Ba	8.5	28	0.56	1.7	1.6	5.9	8.9	0.91	3.4	1.79
Cu	4.4	2.3	0.10	1.0	0.91	6.4	2.2	0.20	2.1	1.18
Sr	4.0	9.14	0.76	2.7	3.5	17	23	2.0	14	6.1
Ti	2.2	5.3	0.68	<0.1	1.0	<0.1	3.1	0.37	1.1	0.25
Mo	0.33	0.15	0.003	0.15	0.04	0.88	0.15	0.04	0.07	0.08
As	0.24	<0.01	0.007	<0.01	0.004	<0.01	<0.01	0.004	<0.01	0.007
Zr	0.09	0.10	0.02	0.03	0.05	0.07	0.05	0.04	0.02	0.03
Pb	0.07	0.17	0.02	0.02	0.02	<0.01	0.08	0.01	0.04	0.02
Co	0.04	<0.01	0.01	<0.01	0.02	0.03	0.02	0.007	0.01	0.007
Ni	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	0.19	12	2.2	0.07	0.31	0.09
V	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	0.21	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	0.07
Cr	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.15

Примечание. Курсив – максимальные значения в растениях; * – в г/м².

Причем максимальные запасы фитомассы характерны для зерна пшеницы и бобов сои (табл. 2). Минимальные запасы фито-

массы приходятся на корни. В зерне и бобах, по сравнению с другими органами, максимальны запасы биогенных P, Mg, S и эссенциальных Zn, Mn, Co, Cu, Si элементов. В зерне пшеницы, кроме перечисленных ХЭ, также максимальны запасы As, а в бобах сои – Fe, K, Ni, Sr, Mo, Zr.

Во всех растениях токсичные для них V и Cr локализуются преимущественно в корнях. В надземной фитомассе Бобовых в отличие от Злаковых запасы участвующих в синтезе специфических белков Co и Ni больше, чем в подземной. Повышенное накопление Ni соей, выращиваемой на антропогенно-загрязненных почвах, выявлено в Китае и Аргентине ([Zhang, 2019](#); [Lavado, 2006](#)).

Из всех растений кострец имеет наибольшее число ХЭ (Ti, Fe, Al, Co, As, V, Cr, Ni, Sr, Na, Zr) с максимальными значениями запасов в корнях, что объясняется более развитым биологическим барьером между корнями и надземной частью у Злаковых, и в целом большей абсолютной и относительной биомассой корней у костреца по сравнению с пшеницей.

Соя и козлятник как представители Бобовых отличаются от Злаковых распределением запасов Si, который сосредоточен преимущественно в корнях. Это объясняется тем, что у Злаковых Si играет большую роль в физиологических процессах, чем у Бобовых ([Колесников, 2001](#)).

В целом в данном исследовании у Бобовых запасы ХЭ в надземной фитомассе были выше, чем у Злаковых. Таким образом, наиболее активно из корней в надземную часть растений Плавского плато переходят $P > K > Zn > Mg$. Концентрируются в корнях и слабо переходят в надземную часть $Fe > Na > Al > Co > Zr > As, V, Cr$. Наибольшие запасы большинства ХЭ характерны для надземной части изученных растений, и особенно для зерна пшеницы и бобов сои. Только у костреца запасы фитомассы в корнях сопоставимы с запасами в надземной части.

По сравнению с пшеницей, произрастающей на каштановых почвах Дагестана, во всех органах пшеницы Плавского плато были меньше запасы Mo, больше – K и P в наземной части и корнях, причем в надземной части более чем в 100 раз ([Рамазанова, Ахмедова, 2010](#)). У всех изученных растений вынос P и K с

надземной фитомассой больше, чем у подсолнечника ([Сулейманов, Низамов, 2015](#)).

При выращивании пшеницы практически все поглощенные растениями Ni, V и Cr ежегодно возвращаются в почву с минерализующимися остатками корней (доля отчуждения ~ 0%), 80% Co и 93% Al от общего поглощения выносятся из почвы вместе с урожаем, а также до 90–98% Ca, Fe, Sr, Ti, As, Zr, Pb. Доля отчуждения K, P, S, Mg, Si, Na, Mg, Zn, Ba, Cu превышает 99%. В агроценозе сои весь As, V и Cr остаются в почве вместе с корнями (доля отчуждения ~ 0%), 75–89% Si, Na, Al, Ti, Zr, Pb, Co, а также около 95% Fe и Ba выносятся с надземной частью. Кроме перечисленных ХЭ, в агроценозе сои высокой долей отчуждения отличается Ni (99.5%). Травосмесь характеризуется наибольшим обратным поступлением ХЭ в почву. Абсолютно все ХЭ имеют долю отчуждения < 90%, а As, V и Cr ~ 0%.

Уровень поглощения ХЭ растениями. По результатам расчета K_i , наиболее активно растения поглощают подвижные формы K, P, Ti, Mo, As, Zr, V. Первые два ХЭ относятся к биогенным ([Kabata-Pendias, 2011](#)), а оставшиеся содержатся в растениях, но их подвижные формы не обнаружены в черноземах Плавского плато (табл. 3). Крайне низкие значения K_i свойственны Sr, Ca с высоким содержанием подвижных форм в почвах и фитотоксичным Co и Cr. Все растения, кроме костреца, активно поглощают S. Для козлятника характерно самое высокое значение использования Cu. Соя поглощает Ni активнее других растений, что, вероятно, связано с его участием в формировании особых ферментов у Бобовых – уреазы, дегидрогеназы и др. ([Boer et al., 2014](#)).

Полученные на Плавском плато значения K_i K и P для пшеницы и сои в несколько раз превышают средние значения для данных культур по литературным данным, возможно, это объясняется более благоприятными почвенно-биоклиматическими условиями территории и минеральным составом почвообразующих пород. Значения K_i для костреца по этим ХЭ в целом соответствуют литературным данным ([Рыжих, Липатников, 2018](#)). Значения K_i P у всех растений в десятки раз превосходят максимальное значение для подсолнечника ([Сулейманов, Низамов, 2015](#)).

Естественная луговая растительность поймы Эльбы погло-

щает сопоставимое количество Ni и больше подвижных Cu и Zn из почв, вероятно, за счет более высоких концентраций в почвах при безбарьерном накоплении ([Overesch et al., 2007](#)).

Таблица 3. Коэффициенты использования элементов из почвы растениями

Table 3. Coefficients of use of elements from soils by plants

ХЭ	Пшеница	Соя	Кострец	Козлятник
K	0.48	2.3	0.02	0.02
P	3.3	5.4	1.6	1.3
S	2.4	4.2	0.59	1.1
Mg	0.06	0.20	0.01	0.01
Ca	0.01	0.03	0.001	0.003
Si	0.07	0.03	0.16	0.55
Na	0.32	0.05	0.02	0.01
Fe	0.23	0.19	0.11	0.40
Al	0.03	0.02	0.02	0.03
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01
Zn	0.18	0.23	0.18	0.23
Ba	0.01	0.003	0.002	0.002
Cu	0.97	0.85	0.84	1.31
Sr	0.004	0.02	0.001	0.001
Ti	>1	>1	>1	>1
Mo	>1	>1	>1	>1
As	>1	>1	>1	>1
Zr	>1	>1	>1	>1
Pb	0.004	>1	>1	>1
Co	0.002	0.003	0.001	0.001
Ni	0.001	0.219	0.0043	0.0089
V	>1	>1	>1	>1
Cr	0.003	0.0004	0.0024	0.0071

Примечание. Курсивом выделены элементы с $K_i > 1$.

ВЫВОДЫ

Максимальный вынос ХЭ из изученных почв происходит при выращивании пшеницы и сои: K (общим объем выноса с запасами в растениях – $25 \pm 19 \text{ кг/м}^2$) > P (8 ± 1.4), Ca (9 ± 6) > Mg ($5 \pm$

3), $S (4 \pm 1) > Fe (223 \pm 83 \text{ г/м}^2) > Mn (86 \pm 43 \text{ г/м}^2)$ и $Zn (60 \pm 0.8 \text{ г/м}^2)$. Эти же элементы, но в меньшей степени, выносятся при укосе травосмеси из козлятника и костреца. Для компонентов травосмеси минимальна и доля отчуждения ХЭ с урожаем по сравнению с другими агроценозами. Только для изученных представителей семейства Бобовых доля Ni , выносящегося с надземной фитомассой, превышает долю, остающуюся в корнях.

Наиболее активно растения поглощают подвижные формы К, Р, Ti, Mo, As, Zr, V. Крайне низкие значения Ки свойственны Sr, Ca, Co и Cr.

На основе ресурсного метода оценки качества почв можно утверждать, что черноземы Плавского плато характеризуются низким уровнем загрязнения Cu и Ni , умеренной обеспеченностью подвижными формами К при недостатке Р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970, 488 с.
2. *Арлянов В.А., Волкова Е.М., Нечаева И.А., Скворцова Л.С.* Содержание тяжелых металлов в почве как индикатор антропогенного загрязнения Тульской области // Известия Тульского гос. университета. Естественные науки. 2015. № 4. С. 194–204.
3. *Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений. М: ГЕОС, 2005. 457 с.
4. *Ильин В.Б.* Биогеохимия и агрохимия микроэлементов (Mn, Cu, Mo) в южной части Западной Сибири. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 1973. 401 с.
5. *Ковалевский А.Л.* Основные закономерности формирования химического состава растений // Биогеохимия растений: тр. Бурят. ин-та ест. наук. Улан-Удэ: Бурятское книжное изд-во, 1969. С. 6–28.
6. *Колесников М.П.* Формы кремния в растениях // Успехи биологической химии. 2001. №. 41. С. 331–332.
7. *Радов А.С., Пустовой И.В., Корольков А.В.* Практикум по агрохимии. М: Колос, 1971. 335 с.
8. *Рамазанова Н.И., Ахмедова З.Н.* Круговорот микроэлементов в посевах пшеницы на лугово-каштановой почве // Вестник Дагестанского государственного университета. 2010. № 6. С. 63–67.
9. *Рыжих Л.Ю., Липатников А.И.* Расчеты доз применения минеральных удобрений в севооборотах. Казань: Казанский университет, 2018. 19 с.

10. *Ряховский А.В., Ярцев Г.Ф.* Содержание и запасы химических элементов в пахотном слое основных типов и подтипов почв Оренбургской области // Известия Ориенбургского государственного университета. 2006. Т. 2. № 10. С. 108–109.
11. *Смагин А.В., Шоба С.А., Макаров О.А.* Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства (на примере г. Москвы). М: Издательство Московского университета, 2008. 360 с.
12. *Сулейманов С.Р., Низамов Р.М.* Хозяйственный вынос, коэффициенты использования элементов питания подсолнечником в зависимости от применения биопрепаратов // Вестник Казанского ГАУ. 2015. Т. 2. № 36. С. 151–155.
13. *Шопина О.В., Семенов И.Н., Парамонова Т.А.* Накопление тяжелых металлов и ^{137}Cs в растительной продукции, выращиваемой на радиоактивно загрязненных черноземах Тульской области // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 6. С. 48–53. DOI: [10.18412/1816-0395-2020-6-48-53](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-48-53).
14. *Boer J.L., Mulrooney S.B., Hausinger R.P.* Nickel-dependent metalloenzymes // Arch. Biochem. Biophys. 2014. No. 544. P. 142–152. DOI: [10.1016/j.abb.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.abb.2013.09.002).
15. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. New York: CRC Press, 2011. 467 p.
16. *Kabata-Pendias A., Szteke B.* Trace elements in abiotic and biotic environments. New York: CRC Press, 2015. 391 p.
17. *Lavado R.S.* Concentration of potentially toxic elements in field crops grown near and far from cities of the Pampas (Argentina) // Journal of Environmental Management. 2006. Vol. 80. No. 2. P. 116–119. DOI: [10.1016/j.jenvman.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.003).
18. *Liu G., Yu Y., Hou J., Xue W., Liu X., Liu Y., Wanhua W., Ahmed A., Tasawar H., Zhengtao L.* An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-acid battery factory // Ecol. Indic. 2014. No. 47. P. 210–218. DOI: [10.1016/j.ecolind.2014.04.040](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.040).
19. *Overesch M., Rinklebe J., Broll G., Neue H.U.* Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany) // Environ. Pollut. 2007. Vol. 145. No. 3. P. 800–812. DOI: [10.1016/j.envpol.2006.05.016](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.016).
20. *Wang L., Yin X., Gao S., Jiang T., Ma C.* In vitro oral bioaccessibility investigation and human health risk assessment of heavy metals in wheat grains grown near the mines in North China // Chemosphere. 2020. No. 252. P. 1–6. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.126522](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126522).

21. Zhang T., Xu W., Lin X., Yan H., Ma M., He Z. Assessment of heavy metals pollution of soybean grains in North Anhui of China // Sci. Total Environ. 2019. No. 646. P. 914–922. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.07.335](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.335).

REFERENCES

1. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* (A manual on chemical analysis of soils), Moscow: Moscow State University, 1970, 488 p.
2. Arlyapov V.A., Volkova Ye.M., Nechayeva I.A., Skvortsova L.S., Soderzhaniye tyazholykh metallov v pochve kak indikator antropogennogo zagryaz-neniya Tul'skoy oblasti (The content of heavy metals in the soil as an indicator of anthropogenic pollution of the Tula region), *Izvestiya Tul'skogo Gos. Universiteta*, Yestestvennyye nauki, 2015, No. 4, pp. 194–204.
3. Bargal'i R., *Biogeokhimiya nazemnykh rastenii* (Biogeochemistry of terrestrial plants), Moscow: GEOS, 2005, 457 p.
4. Il'in V.B., *Biogeokhimiya i agrokhimiya mikroelementov (Mn, Cu, Mo, v) v yuzhnoi chasti Zapadnoi Sibiri* (Biogeochemistry and agrochemistry of trace elements (Mn, Cu, Mo) in the southern part of Western Siberia), Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie RAN, 1973, 401 p.
5. Kovalevskii A.L., Osnovnye zakonomernosti formirovaniya khimicheskogo sostava rastenii (The main laws of the formation of the chemical composition of plants), In: *Biogeokhimiya rastenii* (Biogeochemistry of plants): tr. Buryat. in-ta est. nauk, Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izd-vo, 1969, pp. 6–28.
6. Kolesnikov M.P., Formy kremniya v rasteniyakh (Forms of silicon in plants), *Uspekhi biologicheskoi khimii*, 2001, No. 41, pp. 331–332.
7. Radov A.S., Pustovoi I.V., Korol'kov A.V., *Praktikum po agrokhimii* (Workshop on agrochemistry), Moscow: Kolos, 1971, 335 p.
8. Ramazanova N.I., Akhmedova Z.N., Krugovorot mikroelementov v posevakh pshenitsy na lugovo-kashtanovoi pochve (The microelements cycle in wheat crops on kastanozems), *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, No. 6, pp. 63–67.
9. Ryzhikh L.Yu., Lipatnikov A.I., *Raschety doz primeneniya mineral'nykh udobrenii v sevooborotakh* (Calculations of the doses of mineral fertilizers in crop rotation), Kazan: Kazan University, 2018, 19 p.
10. Ryakhovsky A.V., Yartsev G.F., Soderzhaniye i zapasy khimicheskikh elementov v pakhotnom sloye osnovnykh tipov i podtipov pochv Orenburgskoy oblasti (Content and stocks of chemical elements in the arable layer of the main types and subtypes of soils in the Orenburg region), *Izvestiya*

Oriensburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006, Vol. 2, No. 10, pp. 108–109.

11. Smagin A.V., Shoba S.A., Makarov O.A., *Ekologicheskaya otsenka pochvennykh resursov i tekhnologii ikh vosпроизводства (na primere g. Moskvy)* (Environmental assessment of soil resources and technologies for their reproduction (on example of Moscow), Moscow: Moscow state university, 2008, 360 p.

12. Suleimanov S.R., Nizamov R.M., Khozyaistvennyi vynos, koefitsinty ispol'zovaniya elementov pitaniya podsolnechnikom v zavisimosti ot primeneniya biopreparatov (Household take-out, coefficients of using sunflower nutrition elements depending on the use of biological products), *Vestnik Kazanskogo GAU*, 2015, Vol. 2, No. 36, pp. 151–155.

13. Shopina O.V., Semenov I.N., Paramonova T.A., Nakoplenie tyazhelykh metallov i ¹³⁷Cs v rastitel'noi produktsii, vyrashchivae moi na radioaktivno zagryaznennykh chernozemakh Tul'skoi oblasti (The accumulation of heavy metals and ¹³⁷Cs in plant products grown on radioactive contaminated chernozems of the Tula region), *Ecology and Industry of Russia*, 2020, Vol. 24, No. 6, DOI: [10.18412/1816-0395-2020-6-48-53](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-48-53).

14. Boer J.L., Mulrooney S.B., Hausinger R.P., Nickel-dependent metalloenzymes, *Arch. Biochem. Biophys.*, 2014, No. 544, pp. 142–152, DOI: [10.1016/j.abb.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.abb.2013.09.002).

15. Kabata-Pendias A., *Trace elements in soils and plants*, New York: CRC Press, 2011, 467 p.

16. Kabata-Pendias A., Szeke B., *Trace elements in abiotic and biotic environments*, New York: CRC Press, 2015, 391 p.

17. Lavado R.S., Concentration of potentially toxic elements in field crops grown near and far from cities of the Pampas (Argentina), *Journal of Environmental Management*, 2006, Vol. 80, No. 2, pp. 116–119, DOI: [10.1016/j.jenvman.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.003).

18. Liu G., Yu Y., Hou J., Xue W., Liu X., Liu Y., Wanhua W., Ahmed A., Tasawar H., Zhengtao L., An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-acid battery factory, *Ecol. Indic.*, 2014, No. 47, pp. 210–218, DOI: [10.1016/j.ecolind.2014.04.040](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.040).

19. Overesch M., Rinklebe J., Broll G., Neue H.U., Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany), *Environ. Pollut.*, 2007, Vol. 145, No. 3, pp. 800–812, DOI: [10.1016/j.envpol.2006.05.016](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.016).

20. Wang L., Yin X., Gao S., Jiang T., Ma C., In vitro oral bioaccessibility investigation and human health risk assessment of heavy metals in wheat grains grown near the mines in North China, *Chemosphere*, 2020, No. 252, pp. 1–6, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.126522](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126522).

21. Zhang T., Xu W., Lin X., Yan H., Ma M., He Z., Assessment of heavy metals pollution of soybean grains in North Anhui of China, *Sci. Total Environ.*, 2019, No. 646, pp. 914–922, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.07.335](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.335).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-109-145



Ссылки для цитирования:

Петров Д.Г. Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 109-145. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-109-145

Cite this article as:

Petrov D.G. The paths of migration of charcoal particles in the post-pyrogenic soils of the taiga and tundra depending on features of fire and environmental factors, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 109-145, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-109-145

Благодарность:

Автор выражает благодарность А.А. Семиколенных, А.А. Алейникову, Л.В. Пучниной, администрациям Печоро-Илычского и Пинежского заповедников, лесничествам Пинежского лесхоза, Г.В. Матышаку и О.Ю. Гончаровой за возможность участия в экспедиции и предоставленные данные. Особую признательность автор выражает С.В. Горячкину, Н.С. Мергелову, Э.П. Зазовской, А.В. Долгих и научной группе SoilArt. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 19-29-05238 “мк” и № 18-05-60279 “Арктика”, а также государственного задания ИГ РАН № 0148-2019-0006 (концептуальное моделирование миграции углистых частиц).

Acknowledgments:

The author expresses gratitude to A.A. Semikolennykh, A.A. Aleinikov, L.V. Puchnina, the administrations of the Pechora-Ilych and Pinezhsky reserves, and the Pinezhsky forestries, to G.V. Matyshak and O.Yu. Goncharova for the opportunity to participate in the expedition and for the data provided. The author especially wants to thank S.V. Goryachkin, N.S. Mergelov, E.P. Zazovskaya, A.V. Dolgikh and SoilArt Research Group. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of the scientific projects: No. 19-29-05238 “mk” and No. 18-05-60279 “Arktika”, as well as by the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. 0148-2019-0006 (conceptual modeling of charcoals particles migration).

¹Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды

© 2020 г. Д. Г. Петров

*Институт географии РАН (ИГ РАН),
119017, Москва, Старомонетный переулок, 29, стр. 4,
<https://orcid.org/0000-0001-8338-5169>, email: pd437807@mail.ru.
Поступила в редакцию 14.05.2020, после доработки 15.12.2020,
принята к публикации 17.12.2020*

Резюме: Работа посвящена анализу закономерностей перемещения углистых частиц в испытывающих периодическое влияние пожаров экосистемах средней тайги, северной тайги и южной тундры. Так как хвойная растительность подвержена интенсивному горению, пожары часто приводят к циклическим изменениям в растительном покрове. В ходе горения происходит повреждение подстилки, что делает почвенный покров уязвимым для эрозии. Интенсивные пожары оказывают влияние на количество пирогенного материала, способного храниться тысячелетиями в благоприятных условиях. Целью исследования стало оценить воздействие факторов среды на особенности миграции углистых частиц в современных хронорядх пожаров (от 1 года до 119 лет). Были рассмотрены особенности почв (гранулометрический состав, влажность), особенности рельефа (наличие понижений), влияние интенсивности осадков после пожара, а также специфика горючего материала подстилки. На территории средней и северной тайги, в Печоро-Илычском и Пинежском заповедниках, рассмотрены текстурно-дифференцированные и альфегумусовые почвы. На территории южной тундры, в районе п. г. т. Заполярный, рассмотрены торфяно-глееземы. Выявлено, что миграция углей в глубину почвенного профиля в наибольшей степени зависит от гранулометрического состава – так, в более опесчаненных почвах угли рассеяны по всему профилю, а в тяжелых почвах они сконцентрированы выше первого тяжелого горизонта. Характер миграции углей определяет их форма и размер,

¹ Статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

которые зависят от типа сгоревшего растительного сообщества. Сообщества с разрозненным древостоем с преобладанием в мохово-лишайниковом покрове лишайников горят с образованием микрочастиц угля или дисперсных углистых частиц, легко перемещающихся по профилю почвы (до глубины 80 см). Растительные сообщества, имеющие в своем составе больше древесных видов, формируют при горении крупные углистые частицы, часто присутствующие в новообразованной подстилке. На миграцию угля оказывает влияние как климат природной зоны, так и постпирогенная эрозия. Таким образом, в зависимости от разнообразия условий среды скорость и объемы миграции углистых частиц значительно варьируют как при сравнении разных природных зон, так и в пределах одной зоны. Разработаны четыре схемы путей миграции углистых частиц по профилю с течением времени: равномерно-диффузная, неравномерно-диффузная, барьерная и турбационная.

Ключевые слова: дисперсные углистые частицы, пиролиз, пирогенное событие, интенсивность пожара, послепожарная эрозия, периодичность пожаров, республика Коми.

²The paths of migration of charcoal particles in the post-pyrogenic soils of the taiga and tundra depending on features of fire and environmental factors

D. G. Petrov

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
4 Bld. 29 Staromonetny per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0001-8338-5169>, email: pd437807@mail.ru.*

Received 14.05.2020, Revised 15.12.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: The work is devoted to the analysis of the regularities of the movement of charcoal particles in the ecosystems of the middle taiga, northern taiga and southern tundra experiencing the influence of fires. Since coniferous vegetation is subjected to intense combustion, fires often lead to cyclical changes in the vegetation cover. The process of burning leads to the forest

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. "Soil Science: Horizons of the Future", February 11–14, 2020.

litter damage, making the soil cover vulnerable to erosion. Intense fires affect the amount of pyrogenic material that can be stored for thousands of years under favorable conditions. The aim of the research was to estimate the influence of environmental factors on the use of carbonaceous particles in modern time series (from 1 to 119 years). The features of soils (particle size distribution, moisture content), relief features (presence of depressions), the effect of precipitation material after a fire, as well as features of combustible litter were considered. On the territory of the middle and northern taiga, in the Pechora-Ilychsky and Pinezhsky reserves, textural-differentiated and alpha-humus soils are considered. On the territory of the southern tundra, in the area of the settlement Zapolyarny, peat-gley soils are considered. It was revealed that the migration of coal to the depth of the soil profile depends to the greatest extent on the particle size distribution – for example, in more sandy soils, coals are scattered throughout the profile, and in clay soils they are concentrated above the first fine-textured horizon. The nature of the coals determines their shape and size, which depend on the type of burnt plant community. Communities with a scattered stand, dominated by lichens in the moss-lichen cover, burn with the formation of microparticles of coal or dispersed carbonaceous particles that easily move along the soil profile (up to the depth of 80 cm). Plant communities with more tree species in their composition, during combustion form large carbonaceous particles, which are often present in the newly formed litter. Charcoal migration is influenced by both the climatic zone and post-pyrogenic erosion. Thus, depending on the variety of environmental conditions, the speed and volume of movement of carbonaceous particles change significantly both when comparing different natural zones and within one zone. Four schemes have been developed for the motion of charcoal along the profile over time: uniformly diffused, unevenly diffused, barrier and turbation.

Keywords: dispersed charcoal particles, pyrogenesis, pyrogenic event, fire intensity, postfire erosion, frequency of fires, Komi Republic.

ВВЕДЕНИЕ

Миграция углистых частиц может служить ключом к реконструкции распространения и интенсивности горения современных пожаров. Важным понятием для описания миграции углистых частиц является понятие антракомассы. Антракомасса или концентрация углистых частиц в почве – это совокупная масса углей, погребенная в почвенном профиле. Также антракомасса может быть определена в отдельном почвенном горизонте или, например, под-

стилке. Данные о путях миграции продуктов пожара помогают оценить степень влияния пирогенного события на эрозию почвенного покрова; в комбинации с дендрохронологическим методом помогают выявить несколько пирогенных событий, наложенных друг на друга (по возрасту шрамов от пожаров), а с использованием метода сухого просеивания позволяют определить концентрацию антракомассы в почвенном профиле ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)). Интенсивность пожара определяется температурой горения, что напрямую отражается на повреждениях растительности. В зависимости от температуры горения значительно меняется состав растительных сообществ, химические и физические свойства почв ([Certini, 2005](#)). Исследования путей миграции углистых частиц представляется автору актуальным направлением исследований пирогенеза.

Устойчивость к внешним воздействиям, наряду с хорошей сохранностью анатомической структуры углей ([Scott, 2009](#)), дает возможность определять состав пород на момент пожара ([Бобровский, 2010](#); [Jones et al., 1991](#); [Scott, Jones, 1991](#); [Scott, 2000a](#)). Благодаря современным возможностям мониторинга пожаров (Геосервис “Сканэкс”, <https://fires.ru/>) появилась возможность связать возраст пожара с глубиной проникновения углистых частиц в почвенный профиль. Почвы, в отличие от осадочных пород, обладают особым, палимпсестовым типом записи информации ([Гаргульян, 2019](#)). Такой тип записи, в отличие от книгоподобного в осадочных породах, характеризуется стиранием (полным или частичным) предыдущего этапа функционирования почв и наложению поверх него нового.

В работах, посвященных теме миграции углистых частиц, делается упор на характерные почвенные морфоны, такие как углистые прослои ([Чевычелов, 1997](#)) или угли в пахотном слое и характерные образования от вывалов ([Бобровский, 2010](#); [Bobrovsky et al., 2018](#)). В статье сделана попытка описать закономерности путей миграции углей вне морфонов так как в почвах может не быть вывалов, заполненных углистыми частицами, пахотного горизонта со следами подсечно-огневого земледелия, пирогенных (с высокой концентрацией продуктов горения) горизонтов. Для прогноза закономерности миграции углистых частиц требуется учи-

тивать такие факторы: климат, изменение параметров почвы продуктами горения, интенсивность пожара, в частности температуру горения, видовой состав древесных пород, размеры углистых частиц.

Климат влияет на миграцию продуктов после оголения почвенного покрова – через слепожарную эрозию, вызванную осадками и ветром. Масса углей (антракомасса), эродированных вместе с верхним почвенным слоем в понижениях рельефа всегда выше, чем на повышенных участках ([Moody, Martin, 2001](#); [Shakesby, Doerr, 2006](#)). Это обуславливает поиск углистого материала не только в автоморфных позициях, но и в днищах оврагов, пересохших руслах и других аккумулятивных формах рельефа для формирования полной картины распределения продуктов пожара.

Отдельную группу продуктов пожара составляют ароматические вещества, влияющие на изменения гидрофобных свойств почвы ([Дымов и др., 2015](#); [Sander, Pignatello, 2005](#); [Bodi et al., 2011](#)). Заболачивание, возникающее после особо интенсивных пожаров, обуславливает перенос углистых частиц на значительное расстояние от эпицентра пирогенного события ([Clark, Patterson, 1997](#)).

Другим фактором выступает видовой состав деревьев, который может повлиять на полноту сгорания. В результате действия высокой температуры происходит разрушение части химических связей и изменения функциональных групп, что называется пиролизом ([Bustin, Guo, 1999](#)). Установлено, что древесина большинства лесов, к примеру, включает около 70% целлюлозы и 30% лигнина (без учета других составляющих). В течение процесса обугливания лигнин оказывается устойчивей, чем целлюлоза. Так, после вытеснения влаги (110 °C) начинает разлагаться целлюлоза (110–270 °C) с образованием газов и смол. Лигнин же начинает разрушаться только при температуре 400 °C, а с образованием угля – при температуре около 500 °C ([Pyne et al., 1996](#)). Таким образом, содержание лигнина в древесине косвенным образом влияет на количество образовавшихся углей. Стоит так же отметить, что, если территория подверглась влиянию нескольких пожаров, то возможно дожигание старых продуктов пиролиза ([Certini, 2005](#)). То есть сохранность углей может зависеть от периодичности по-

жаров.

Размер углистых частиц также имеет большое значение. Угли большего размера в ряде экспериментов показали лучшую плаваемость, чем более мелкие ([Vaughn, Nichols, 1995](#)). Николс с соавторами ([Nichols et al., 2000](#)) выявил, что угли могут перемещаться на значительные расстояния в состоянии суспензии, и смогли объяснить их обилие в некоторых прибрежных морских отложениях.

Картину усложняет тот факт, что в зависимости от типа растительности одна и та же температура горения может вызвать гибель леса и полное его сгорание (ель или сосна), или проявиться только в виде шрамов после пожара (лиственница). Связать уголь с определенным видом растения (за исключением мхов, лишайников и трав) бывает просто, так как уголь в большинстве случаев характеризуется хорошей сохранностью ([Scott, 2001](#)). Есть сведения о сохранении в исходном виде даже лепестков растений ([Prior, Alvin, 1983](#); [Lupia, 1995](#)).

Таким образом, характер растительности напрямую связан со следующим фактором миграции продуктов пожара – размером углистых частиц. Частицы угля от 0.001 до 0.063 мм разносятся ветром как часть дыма ([Komarek et al., 1973](#)) и называются дисперсными углистыми частицами. Часто такие частицы в виде маленьких угольных фрагментов образуют листья и тонкие веточки, в результате сожжения верховым/кроновым пожаром. Воздушный тип переноса – наиболее дальний – частицы могут перемещаться на многие километры от места пожара ([Clark, 1988](#)). В зависимости от массы частиц происходит их постепенное оседание, и наиболее тяжелые располагаются ближе к эпицентру ([Clark, Patterson, 1997](#)). По этой причине связать наиболее мелкие частицы угля с определенным пожаром затруднительно.

Угли, имеющие размерность от 0.063 до 0.5 мм, переносятся в основном водными потоками.

Более крупные частицы (> 0.5 мм) часто используются для анализа интервала между пожарами ([Clark, Patterson, 1997](#)). Угли самого разного размера могут образовываться при горении кустарничков и подстилки, а не только древесных остатков, что надо учитывать при исследованиях. Взвешенные частицы переносятся в реки, после чего, дойдя по руслу до заболоченного участка, могут

сформировать пирогенный слой.

Так как ветром переносится небольшое количество углей размером более 0.063 мм, то их скопление в наибольшей степени указывает на факт локального пожара ([Clark et al., 1997](#)). Это подтверждают исследования ученых, показавших ограниченный радиус распространения макрочастиц углей, по сравнению с другими его размерностями: [Nichols et al., 2000](#); [Scott, 2000a](#); [Scott, 2000b](#).

При застойном увлажнении частицы угля любого размера с течением времени оседают на дно ближайшего водоема или болота. Осев один раз, как показано в опыте Николса и соавторов ([Nichols et al., 2000](#)), он становится малоподвижным и для его дальнейшего переноса требуется течение с большой кинетической силой.

Таким образом, уголь размером от 0.063 мм до 0.5 мм может использоваться для определения региональных пожаров. Уголь > 0.5 мм, при его большом скоплении, – свидетельство локального пожара. Смесь углей разного размера тоже указывает на локальные пожары ([Collinson et al., 2007a](#)).

Другие важные факторы миграции могут определяться особенностями самого пожара. Так, для определения миграции и масштабов распространения огня важно определить тип пожара (верховой, низовой), его интенсивность и учесть особенности местности.

В данной работе предполагается, что в разных природных зонах, в зависимости от типа почв, растительности, интенсивности пожара и параметров климата, характер миграции углей существенно меняется. В зависимости от совокупности факторов среды на момент пожара образуются углистые частицы разного размера, меняется характер их распределения по профилю и место аккумуляции в рельефе. Однако, выделив для каждой природной зоны условия среды, значимо влияющие на миграцию продуктов горения, можно предсказать характер их залегания в профиле.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проходили в трех различных районах. Первый район находился в Печоро-Илычском заповеднике (республика

Коми, Троицко-Печорский район), в подзоне средней тайги. Объекты исследования данного участка находились вверх по течению р. Печоры от поселка Якша. Средняя температура января – -18.2°C , июля – $+16.8^{\circ}\text{C}$, количество осадков 675 мм/год, сумма активных температур 1 600 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.1) ([Семиколенных и др., 2013](#)).

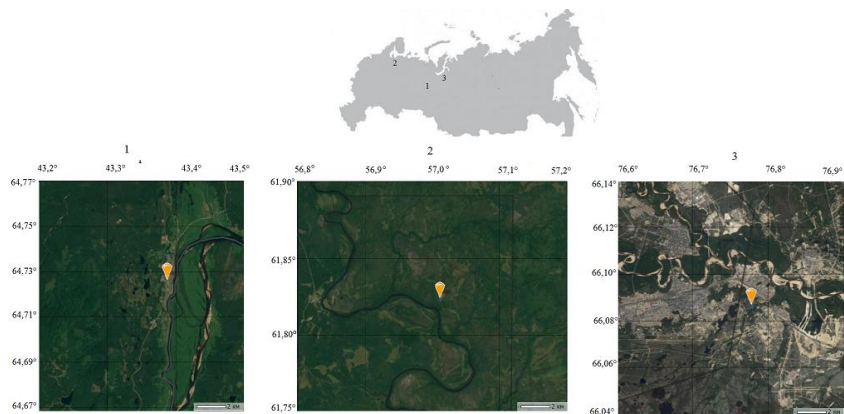


Рис. 1. Расположение районов исследования на контуре России: **1** – Печоро-Илычский заповедник, республика Коми, подзона средней тайги. **2** – Окрестности п. г. т. Пинега, Архангельская область, подзона северной тайги. **3** – Окрестности г. Новый Уренгой, Ямало-Ненецкий автономный округ, граница подзон северной тайги и южной тундры.

Fig. 1. Location of the study areas on the contour of Russia: **1** – Pechora-Ilychsky Nature Reserve, Komi Republic, middle taiga subzone. **2** – Neighborhoods of the urban village of Pinega, Arkhangelsk region, subzone of northern taiga. **3** – Neighborhoods of Novy Urengoy, Yamalo-Nenets Autonomous region, border of subzones of northern taiga and southern tundra.

Были исследованы подзолистые почвы и буроземы. Данные о восьми разрезах представлены в таблице (табл. 1). Разрезы заложены на террасах р. Печоры. Здесь и далее возраст пожаров посчитан на момент исследования – 2019 г. В данном районе наибольшее влияние на миграцию углей оказали высокая влажность и суглинистый гранулометрический состав почв. Рассмотренные пожары зачастую низовые, слабоинтенсивные.

Таблица 1. Объекты в подзоне средней тайги (данные о возрасте пожаров предоставлены А.А. Алейниковым)

Table 1. Objects in the middle taiga subzone (data on the age of fires provided by A.A. Aleinikov)

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Терраса р. Печоры	N: 62°02'11" E: 58°58'07"	Подзолистоглеевая типичная	Первые 30 см	Папоротник с мало- мощной подстилкой и разреженным древостоем	169 лет	Плоский, пристволь- ные повы- шения
Терраса р. Печоры, русло ручья	N: 62°02'15" E: 58°58'40"	Бурозем оподзоленный	Первые 10 см	Разнотравье с бедной подстилкой и плотным древостоем	79лет	Пологий
Терраса р. Печоры,	N: 62°00'03" E: 58°46'03"	Бурозем грубогумуси- рованный	С поверх- ности	Разнотравье с бедной подстилкой и плотным древостоем	119 лет	Пологий
Терраса р. Печоры	N: 62°06'08" E: 58°24'57"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Ельник-черничник с плотным древостоем	119 лет	Плоский, пристволь- ные повы- шения

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Терраса р. Печоры,	N: 62°06'18" E: 58°25'22"	Бурозем типичный	Первые 10 см	Ельник-черничник с плотным древостоем, с примесью березы	85 лет	Плоский
Терраса р. Печоры, высокий берег	N: 62°03'54" E: 58°29'05"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Ельник-черничник с плотным древостоем	Около 50 лет	Плоский, пристволь- ные повы- шения
Поселок Якша	N: 61°49'12" E: 56°52'39"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Лишайник с редким древостоем	Около 10 лет	Плоский, пристволь- ные повы- шения
Поселок Якша	N: 61°49'12" E: 46°52'41"	Подзол иллювиально- гумусовый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 15 лет	Пологий

Второй район исследования расположен в Пинежском районе Архангельской области, на территории Пинежского заповедника и окрестностей. Данный район, находится в подзоне северной тайги. Средняя температура января – -14.7°C , июля – $+14.3^{\circ}\text{C}$ среднегодовое количество осадков – 570 мм/год, сумма активных температур – $1\,305^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.2).

Необычность объекта исследования связана с распространением гипсового карста ([Пучнина и др., 2000](#)). Почвы были представлены в основном подзолами иллювиально-железистыми. В таблице приведены данные о восьми типах почв (табл. 2). В данном районе на перераспределение углей влияет рельеф и процессы эрозии. Рассмотренные пожары – низовые и верховые, разной интенсивности.

Третий район исследований расположен на севере Западной Сибири (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО) в пределах северной границы распространения северной тайги (рис. 1.3), в краевой части III озерно-аллювиальной равнины р. Надым, на междуречье Хейгияха – Левая Хетта. Средняя температура января – -23.0°C , июля $+13.5^{\circ}\text{C}$, продолжительный зимний период, количество осадков варьирует от 450 до 650 мм в год, сумма активных температур $< 800^{\circ}\text{C}$.

Также было заложено несколько разрезов около поселка городского типа Заполярный (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО) в тундровой зоне. Средняя температура января – -26.6°C июля – $+10.5^{\circ}\text{C}$. Количество осадков – 519 мм/год (рис. 3). Поблизости пролегал газопровод, что стало причиной заболачивания. Всего было заложено 6 разрезов. На каждом участке заложено по 2–4 разреза у трубы, где сезонно-талый слой имел большую мощность, чем в среднем по тундре и на контроле в 30–50 м. Почвы представлены глееземами в зоне тундры и подзолами в подзоне северной тайги (табл. 3). Возраст пожара был определен приблизительно по степени развития вторичной сукцессии. Пожар в подзоне северной тайги прошел в течение экспедиции в 2018 г. В подзоне южной тундры на миграцию углей оказала влияние высокая влажность, антропогенные нарушения и криотурбации. Рассмотренные пожары низовые, слабоинтенсивные или подземные.

Таблица 2. Объекты в подзоне северной тайги (данные о возрасте пожаров предоставлены Кулойским и Пинежским лесничествами и Л.В. Пучниной по карте Д.Н. Сабурова)

Table 2. Objects in the northern taiga subzone (data on the age of the fires were provided by Kuloisky and Pinezhsky foresties and L.V. Puchnina on the map of D.N. Saburov)

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Террасы р. Кулой	N: 64°44'51" E: 43°23'01"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 80 лет	Днище воронки
Террасы р. Кулой	N: 64°44'04" E: 43°23'01"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	Около 80 лет	Днище воронки
Центр Пинежского заповедника	N: 64°34'09" E: 43°06'54"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	82 года	Плоский
Центр Пинежского заповедника	N: 64°34'31" E: 43°03'01"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Зеленомошник с плотным древостоем	58 лет	Плоский
Северо-запад Пинежского заповедника	N: 64°38'28" E: 42°48'50"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Разнотравье с редким древостоем	15 лет	Днище воронки

Северо-запад Пинежского заповедника	N: 64°38'28" E: 42°48'50"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Разнотравье с частым подростом	15 лет	Плоский на повы- шении
Террасы р. Кулой	N: 64°56'35" E: 43°33'25"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Разнотравье с частым подростом	4 года	Плоский
Террасы р. Кулой	N: 64°43'45" E: 43°22'48"	Подзол иллювиально- железистый	Весь профиль	Лишайник с разреженным древостоем	2 года	Плоский

Таблица 3. Объекты в зоне тундры и подзоне северной тайги. Координаты предоставлены Матышаком Г.В.
Table 3. Objects in the tundra zone and the northern taiga subzone. Coordinates are provided by Matyshak G.V.

Местополо- жение	Координаты	Тип почвы	Зона обна- ружения углей в профиле	Особенности Растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Тундра	N: 66°46'14" E: 74°28'03"	Торфяно-глезем типичный	По всему профилю, фрагмен- тарно	Лишайник	Около 10–15 лет	Плоский
Тундра, поблизости газопровод	N: 66°46'14" E: 74°27'46"	Глезем грубогумусиро- ванный	По всему профилю, фрагмен- тарно	Пушицево- осоковая ассоциация	Около 10–15 лет	Плоский, с локальны- ми пони- жениями

Местоположение	Координаты	Тип почвы	Зона обнаружения углей в профиле	Особенности Растительности	Возраст пожара	Характер рельефа
Тундра, поблизости газопровод	N: 66°46'40" E: 74°27'49"	Глеезем типичный	На глубине 15 см	Лишайник	Около 10–15 лет	Плоский, с локальными понижениями
Тундра, поблизости газопровод	N: 66°46'21" E: 74°27'20"	Торфяно-глеезем типичный	По всему профилю, фрагментарно	Пушицево-осоковая ассоциация	Около 10–15 лет	Плоский, с локальными понижениями
Тундра, ровный участок	В 50 м от предыдущей точки	Торфяно-глеезем типичный	Прослойкой на 9 см	Пушицево-осоковая ассоциация	Около 10–15 лет	Плоский
Северная тайга, окрестности стационара “Надым”	N: 65°18'53" E: 72°52'52"	Подзол иллювиально-железистый	Весь профиль	Лишайник с фрагментами зеленомошника	1 год	Плоский

В ходе работы рассматривалась исключительно вертикальная миграция углистых частиц. Такое решение было принято по той причине, что для построения модели латеральной миграции пока собрано недостаточно материала. Все представленные схемы относятся к современным хронорядам (1–119 лет) пожаров.

Отбор образцов осуществлялся по горизонтам. Затем анализировалось наличие и относительное количество углистых частиц, их размер, сохранность (по форме и твердости) и распределение по профилю ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)). Точки заложения разрезов в каждой зоне выбирались на разных элементах рельефа.

В работе использовались следующие методы: сравнительно-географический, морфологический, метод наблюдения. Проводилось полное морфологическое описание почвенных разрезов ([Классификация и диагностика почв России, 2004](#)), были проанализированы растительные сообщества на местах гарей, отмечены виды, преимущественно появляющиеся после пожаров. В лаборатории осуществлено мокрое просеивание через сита 5, 2, 1 и 0.5 мм ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)), построение модельных схем фронтальной миграции (для углистых частиц). Обработка данных осуществлялась в программе Excel. Антракологический анализ проводится при разном разрешении: микроанализ – на оптическом микроскопе, субмикроанализ – на сканирующем электронном микроскопе с использованием антракологического атласа ([Scott, 2001](#)). Были определены особенности формы и сохранность структуры углистых частиц. Концентрация антракомассы была рассчитана как отношение массы углей к массе почвы, выраженное в процентах ($Ca = (m_u/m_p) \cdot 100$), после отделения всех фракций.

Ca – концентрация антракомассы, выраженная в процентах;

m_u – масса углистых частиц всех размерных фракций;

m_p – масса воздушно-сухой навески почвенного образца.

В литературе можно встретить много примеров такого расчета, постоянно меняются только размерные фракции ([Carcaillet, Thinon, 1996](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подзона средней тайги ЕТР (Европейской территории России)

Как показано в таблице 4, в исследованном районе присутствовали и песчаные, и суглинистые почвы. Было установлено, что в качестве слабопроницаемого барьера для углей в суглинистых почвах выступают горизонты ВМ (в буроземах) и ВЕL (в подзолистых почвах). При этом в песчаных почвах ничто не задерживало миграцию углей по профилю. Более гидроморфные суглинистые почвы нередко имели оторфованную подстилку, тогда как напочвенный покров песчаных почв был представлен маломощным слоем лишайника. Рельеф характеризовался в основном небольшими склонами в 2–3° в предгорьях Урала (кордон Строганная доска), что делало возможным перенос углей водными потоками. Угли в подстилке почв гидроморфных позиций пронизаны гифами грибов и приобрели мягкую торфообразную структуру, но частично сохранили прямоугольную форму. Угли между подстилкой и ВЕL подзолистых почв сильно деформированы, нередко аморфны и потеряли анатомическую память. Угли в подзолах, напротив, отлично сохранились – сверху и до середины профиля имеют прямоугольную форму. В горизонте ВС-С подзолов встречаются угли круглой формы размером до 1 мм. Осадки – главный фактор, определяющий миграцию углей в этом районе исследований.

Глубина и время миграции рассчитаны для суглинистых почв по разрезу самого старого пожара (169 лет).

Подзона северной тайги ЕТР

Почвы подзоны северной тайги, выбранные для исследований, по своим свойствам напоминали почвы подзолов средней тайги. Подстилка, при ее неполном сторании, выступала единственным барьером на пути проникновения углистых частиц в глубину профиля. Два профиля на террасах реки Кулой (табл. 2), а также профили на северо-западе заповедника расположены в сильно расчлененном рельефе. В таких условиях рельеф оказывается определяющим фактором миграции угля, который накапливается в карстовых воронках после слепожарной эрозии.

Таблица 4. Общая характеристика условий миграции углистых частиц в районах исследований
Table 4. General characteristics of the migration conditions of carbonaceous particles in the study areas

Гранулометрический состав	Мощность подстилки	Барьер для миграции углей	Рельеф	Форма и размер углей	Климатический параметр	Глубина и время миграции
Печоро-Ильчский заповедник, подзона средней тайги						
Суглинок Песок	5–15 см	Тяжелый суглинистый горизонт, в подзолах отсутствует	Слабый уклон или плоский	Прямоугольная в подстилке и нарушенная вниз по профилю. Размер от 0.5 до 0.1 мм	Влажность	30–40 см за 169 лет
Окрестности п. Пинега, подзона северной тайги						
Песок	5–10 см	Может создавать подстилка	Воронки до 2–3 м глубиной	Последовательно сменяется с прямоугольной на круглую с глубиной. Все категории размеров	Влажность, ветер	> 80 см за 50 лет
Надымский стационар, подзона северной тайги						
Песок	2–5 см	Нет	Плоский	Изначально формируется много углей размером менее 0.1 мм	Влажность и ветер	Весь профиль за 15 лет
Окрестности п. г. т. Заполярный, подзона южной тундры						
Тиксотропная глина	До 30 см	ММП*	Плоский	Сохраняются лишь крупные угли, бесформенные 2–3 мм	Влажность температура	Весь профиль за 50 лет

Примечание. * – многолетнемерзлые породы.

Угли во всех представленных разрезах (табл. 2) имели прямоугольную форму в верхних и округлую в нижних горизонтах профиля. Содержание антракомассы резко уменьшалось вниз по профилю (табл. 5).

Осадки и ветер, при сильном повреждении подстилки, являются основными факторами миграции для данного района исследований, так как переносят и уголь, и почвенный материал. Глубина и время миграции углей проверены на горельнике возрастом около 80 лет.

Подзона северной тайги Западной Сибири

Почвы подзолов подзоны северной тайги северно Западной Сибири (табл. 3) схожи с почвами северной тайги Европейской территории России (табл. 5). Их особенность – маломощная и уязвимая к воздействию огня лишайниковая подстилка (табл. 7). При горении лишайников и кустарничков нередко образуется уголь менее 0.5 мм, миграция которого протекает с большой интенсивностью. Кроме того, малый размер углистых частиц связан с высокой частотой пожаров – один пожар раз в 10–15 лет, что создает эффект дожигания углей.

Подзона южной тундры севера Западной Сибири

Глееземы, представленные в таблице 3, имеют ряд особенностей. Несмотря на профиль, большая часть которого представлена тиксотропной глиной, и мощную оторфованную подстилку (табл. 8), угли в них встречаются по всему профилю. Причины такого их повсеместного расположения – криотурбации. В результате воздействия влажности от таяния ММП угли быстро повреждаются и теряют свою форму. Температурный режим почв, который может способствовать либо таянию, либо поднятию уровня ММП, во многом определяет миграцию углистых частиц в южной тундре. Скорость миграции рассчитана на антропогенном объекте, представленном газовым трубопроводом.

В Печоро-Ильчском заповеднике на основании исследований 12 разрезов почв с известным возрастом пожаров было замечено, что крупные частицы угля (> 0.5 мм) в основном оседают в подстилке, тогда как угли меньшего размера распространены до

первого горизонта суглинистого гранулометрического состава – ВЕL (что отражено в таблице 4), постепенно уменьшаясь с глубиной. Глубже 30–40 см углистых частиц найдено не было (рис. 2).

Таблица 5. Сравнение концентрации антракомассы в разных горизонтах профиля для карстовой воронки Архангельской области

Table 5. Comparison of the concentration of anthracomass in different profile horizons for the karst sinkholes of the Arkhangelsk region

Образец	Фракция, мм	Концентрация антракомассы от веса почвы, %	Доля каждой фракции в общей антракомассе, %
AE pir1/AEpir2/AEpir3	> 5	1.29	6.29
	2–5		46.13
	1–2		37.80
	0.5–1		9.79
Epir	> 5	0.13	13.54
	2–5		14.26
	1–2		19.79
	0.5–1		52.41
BFpir	> 5	0.02	0.00
	2–5		82.82
	1–2		4.00
	0.5–1		13.17
BCpir	> 5	0.09	0.00
	2–5		44.48
	1–2		41.36
	0.5–1		14.16
[AEpir]	> 5	0.94	23.94
	2–5		61.40
	1–2		12.52
	0.5–1		2.14
[Epir] II	> 5	0.52	4.80
	2–5		75.92
	1–2		12.46
	0.5–1		6.82

Продолжение таблицы 5. Сравнение концентрации антракомассы в разных горизонтах профиля для карстовой воронки Архангельской области

Continued table 5. Comparison of the concentration of anthracomass in different profile horizons for the karst sinkholes of the Arkhangelsk region

Образец	Фракция, мм	Концентрация антракомассы от веса почвы, %	Доля каждой фракции в общей антракомассе, %
[BF/BC]pir II	> 5	0.17	0.00
	2–5		12.06
	1–2		49.29
	0.5–1		38.65
[AEpir] III	> 5	0.74	26.55
	2–5		33.49
	1–2		35.81
	0.5–1		4.15
[AEpir] V	> 5	0.44	21.58
	2–5		29.27
	1–2		40.55
	0.5–1		8.60
[Bpir] III	> 5	0.07	5.03
	2–5		21.44
	1–2		52.12
	0.5–1		21.41
[E/BF] IV	> 5	0.03	0.00
	2–5		28.34
	1–2		24.32
	0.5–1		47.34
[E + BF pir] V	> 5	1.35	13.93
	2–5		61.33
	1–2		20.02
	0.5–1		4.72
[BC pir] V	> 5	0.02	0.00
	2–5		42.95
	1–2		26.18
	0.5–1		30.88
[BC pir] V	> 5	0.14	0.00
	2–5		41.51
	1–2		30.19
	0.5–1		28.30

Такой тип распределения автор предлагает назвать барьерным, поскольку горизонты в профилях подзолистого почвенного горизонта или бурозема формируют естественный барьер, ограничивая вертикальную миграцию.

Однако в случае подзолов, располагающихся в местах с моховым покровом и плотным древостоем (табл. 1), распределение происходит так, как показано на рисунке 3. И, наконец, в местах с редким древостоем и лишайниковым напочвенным покровом – как на рисунке 4.

В песчаных почвах Пинежского заповедника и его окрестностях в случае наличия мощной подстилки и сомкнутого древесного яруса углистые частицы попадают на остатки горизонта О после пожара. С течением времени уголь проникает вглубь профиля, постепенно разрушаясь (что отражено в столбце “глубина и время миграции” таблицы 4). Это наблюдение было сделано на основании исследования морфологической структуры угля, которая становилась все более округлой вниз по профилю, при этом сам уголь уменьшался в размерах (рис. 3). Так как в результате оказывается, что углистые частицы распределены практически по всему профилю почвы – крупные (2–3 мм) угли сосредотачиваются в верхних горизонтах и постепенно уменьшаются с глубиной, – то было предложено назвать такой тип распределения неравномерно-диффузным.

В ходе наблюдений, проведенных в сосняках ягельных подзон средней и северной тайги, было замечено, что уголь в профиле находится в виде углистых частиц малого размера (0.001–0.063 мм) и лишь редкие частицы, встречаемые по всему профилю, имеют больший размер. Такую однородную картину предложено назвать равномерно-диффузным распределением углистых частиц. Морфологическое строение углей в этом случае не читается из-за маленького размера. Характеристика условий миграции в этом случае схожа с подзоной северной тайги, но обладает некоторой специфичностью, например, в мощности подстилки (табл. 4).

Равномерно-диффузная модель описывает миграцию углей при распространении в напочвенном покрове ягеля с разреженным древостоем (рис. 4).

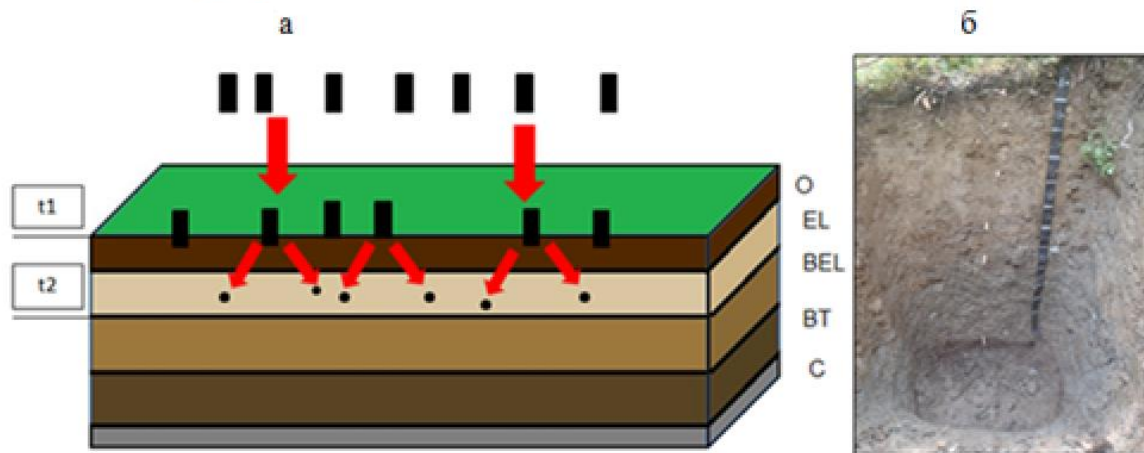


Рис. 2. а – Схема барьерной миграции углей на супесчаных и суглинистых почвах. Черные геометрические фигуры – угли разной формы. Красные стрелки определяют направление вертикальной миграции. Обозначения “t1, t2” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Между завершением пожара – t1 и временем наблюдения – t2 прошло 169 лет. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 2. a – The scheme of the barrier migration of coal on sandy and loamy soils. Black geometric shapes – coals of different shapes. The red arrows indicate the direction of vertical migration. The designations “t1, t2” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. 169 years passed between the end of the fire – t1 and the observation time – t2. **б** – Example of a soil pit.

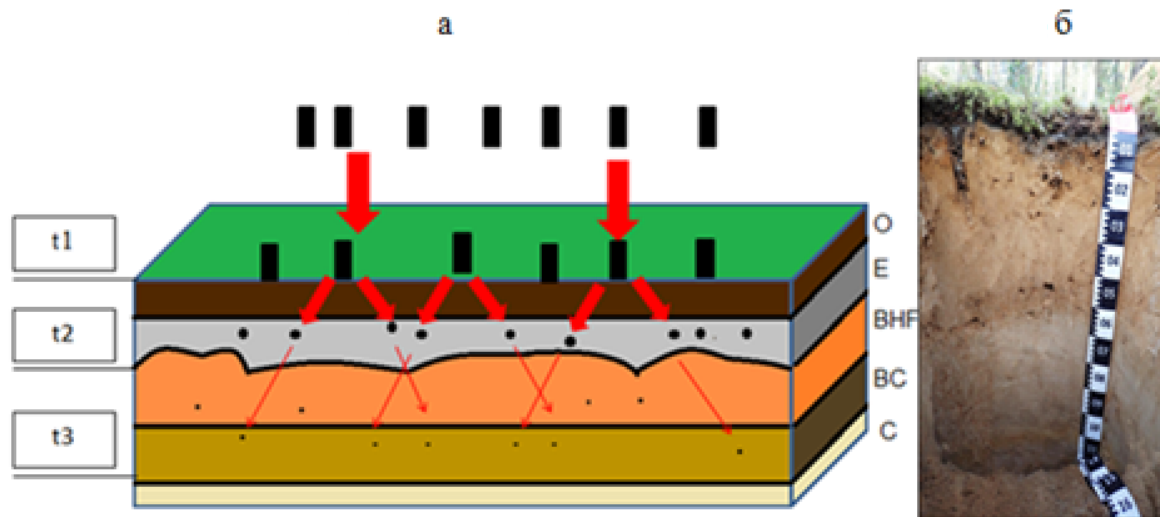


Рис. 3. а – Схема неравномерно-диффузной миграции углей на песчаных почвах. Черные геометрические фигуры – угли разной формы. Красные стрелки определяют направление вертикальной миграции. Обозначения “t1, t2, t3” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Между временем пожара – t1 и временем наблюдения – t3 прошло 50 лет. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 3. a – The scheme of uneven-diffuse migration. Black geometric shapes – coals of different shapes. The red arrows indicate the direction of vertical migration. The designations “t1, t2, t3” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. 50 years have passed between the time of the fire – t1 and the time of observation – t3. **б** – Soil pit example.

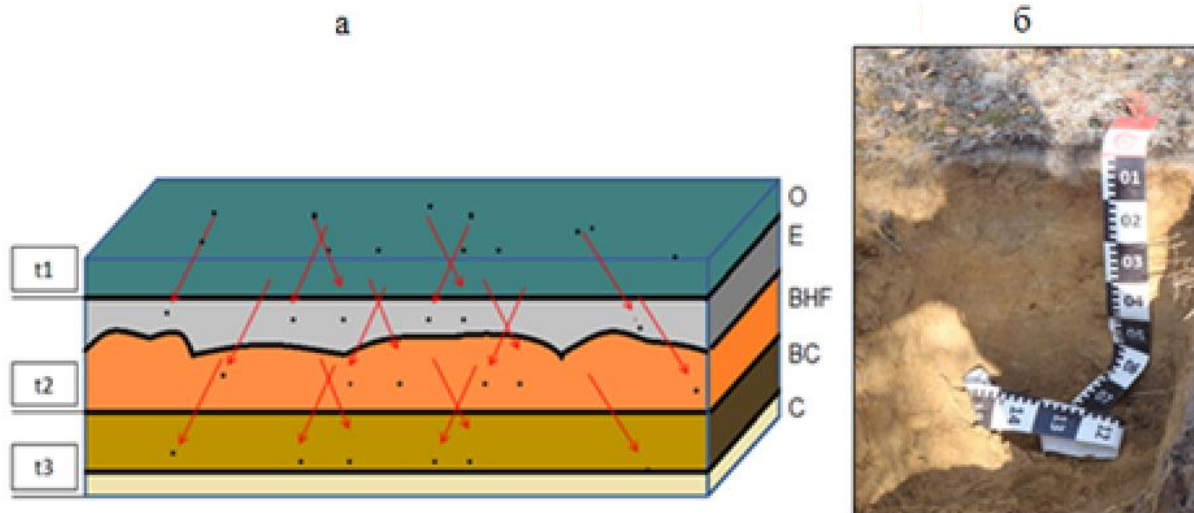


Рис. 4. а – Схема равномерно-диффузной миграции углей в песчаных почвах с лишайниковым покровом. Черные геометрические фигуры – угли. Красные стрелки определяют направление вертикальной миграции. Обозначения “t1, t2, t3” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Интервал между t1 и t2 составляет 10 лет. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 4. a – Scheme of uniformly diffuse coal migration in sandy soils with lichen cover. Black geometric figures are coals. The red arrows indicate the direction of vertical migration. The designations “t1, t2, t3” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. The interval between t1 and t2 is 10 years. **б** – Example of a soil pit.

В тундре были изучены пожары 5–10-летнего возраста (рис. 5).

Заболачивание, распространенное вблизи антропогенных объектов, связанное с близким залеганием ММП (табл. 8), а также криотурбации разрушили углистые частицы. Такой вывод был сделан на основании того, что уголь приобрел неопределенную форму и стал очень похож на торф, в котором он и был найден в профиле. Тип миграции предложено назвать турбационным.

На всех представленных схемах (рис. 2, 3, 4 и 5) можно условно разделить миграцию углей на стадии (t), где возраст увеличивается в ряду $t_1 < t_2 < t_3$. В представленном визуальном материале эти стадии миграции не равны друг другу, как в пределах одной модели миграции, так и при их сравнении, что важно четко понимать. Последовательность стадий для каждого района всегда сохраняется, хотя ее длительность будет зависеть от того, насколько повреждена подстилка, каков гранулометрический состав почвы и какова ее влажность. Так, по наблюдениям, в случае тяжелого гранулометрического состава даже спустя сотни лет после пожара уголь будет сосредоточен в верхних частях профиля (рис. 2). В песчаных почвах уголь распределится по всему профилю на порядок быстрее (рис. 3, 4).

Кроме тундры, во всех остальных подзонах встречались все типы рассмотренных моделей миграции. В подзонах северной и средней тайги возможны сценарии, показанные на рисунках 2, 3 и 4. Рисунки 3 и 4 могут служить примером самого распространенного варианта в местах с песчаными почвами для районов подзон средней и северной тайги, как в Европейском, так и Сибирском районах. Первоначально уголь попадает на остатки подстилки или на горизонт Е (t_1). Затем, все более окатываясь после взаимодействия с водой и с частицами песка, уголь проникает в глубину профиля (t_2 , t_3).

Принципиальная разница, однако, заключается в морфологии самого угля в сценариях, показанных на рисунках 3 и 4. В случае лишайникового покрова на поверхность почвы попадает сразу мелкий уголь, что ускоряет его проникновение в почву.

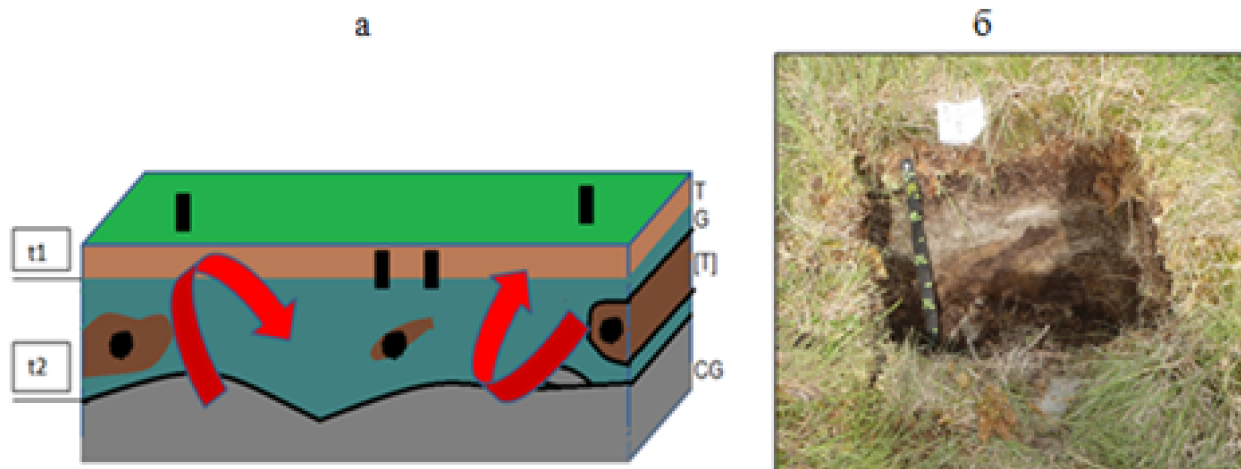


Рис. 5. а – Схема турбационной модели миграции углей при наличии близко расположенных к поверхности многолетнемерзлых пород. Черные геометрические фигуры – угли. Красные стрелки показывают процессы переноса в результате педотурбаций. Обозначения “t1, t2” характеризуют относительное время, прошедшее с начала пожара. Интервал между t1 и t2 составляет 50 лет, отсчитанных по началу установки трубы. **б** – Пример почвенного разреза.

Fig. 5. a – Scheme of a turbulent model of coal migration in the presence of permafrost near the surface. Black geometric figures – coals. The red arrows show the transfer processes as a result of cryoturbation. The designations “t1, t2” characterize the relative time elapsed since the start of the fire. The interval between t1 and t2 is 50 years from the pipe installation. **б** – Example of a soil pit.

В случае промывного водного режима и песчаного состава почвы количество углей обычно равномерно уменьшается с глубиной (табл. 4).

Как демонстрирует рисунок 7, наиболее сохранившуюся структуру имеют угли автоморфных позиций (рис. 7А). В результате продолжительного воздействия влажности углистые частицы теряют морфологическую структуру и прямоугольную форму (рис. 7D), становятся хрупкими и мягкими на ощупь. На рисунке 6 схематично представлены изменения морфологического облика углей в зависимости от возраста пожара.

Отдельно стоит схема миграции углей тундровых экосистем. Так, высокие температуры пожара могут растопить часть многолетнемерзлых пород, после чего освободившаяся вода способствует миграции и повреждению углей, что на схеме изображено в виде бесформенных фрагментов в погребенном горизонте (рис. 5). В последующем (t_2) происходит процесс криотурбации, случайно распределяющий угли по профилю. Однако собранный материал пока не позволяет привести точных значений изменения многолетнемерзлых пород относительно сезонно-талого слоя под воздействием пожара.

В ходе обсуждения хотелось бы затронуть такие важные факторы, как рельеф, почвенные морфоны, интенсивность и периодичность пожаров.

Несомненно, рельеф сильно влияет на миграцию углистых частиц. Основная масса углистого материала в процессе исследования была набрана из понижений самого разного масштаба. С одной стороны, такая аккумуляция очень важна для исследований абсолютного возраста углей, которые часто образуют прослои одного возраста, с другой стороны, она перемешивает угли пожаров разного возраста. Роль аккумулятора продуктов пожара могут играть овраги, болота и любые резкие понижения в рельефе.

Почвенные морфоны служат источником данных для определения абсолютного возраста углей. Сложность составляет то, что методом радиоуглеродного датирования с применением изотопа ^{13}C , который активно используется в настоящее время, возраст современных пожаров определяется с большой ошибкой. При этом палимпсестовый тип записи, характерный для почвенного

профиля, требует от исследователя хорошего навыка интерпретации почвенных процессов, для выявления морфонов с одним возрастом углей.

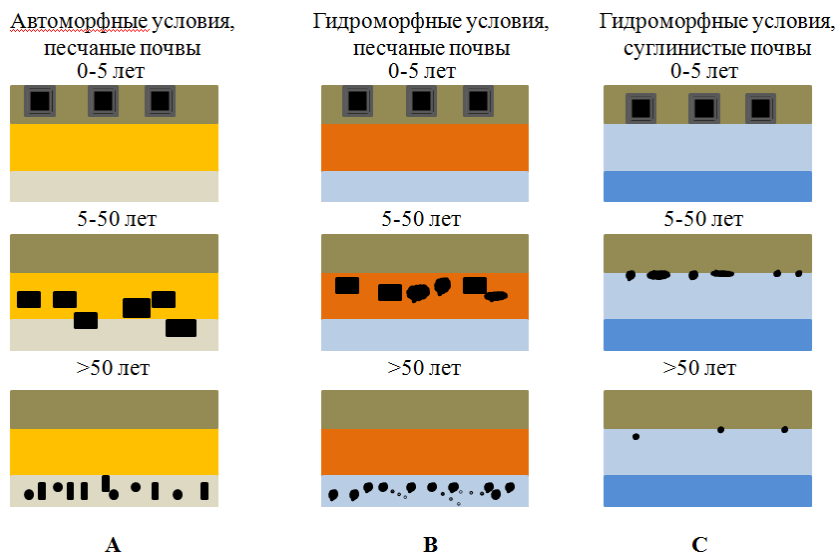


Рис. 6. Влияние возраста пожара на морфологический облик и глубину проникновения углей. Квадратом показана морфологическая структура угля хорошей сохранности. Прямоугольник характеризует нарушенную структуру углей, кружки – округлую. Черные фигуры неопределенной формы показывают сильно деформированный уголь. **А** – демонстрирует миграцию угля в сухих условиях и песчаных почвах. **В** – демонстрирует миграцию угля во влажных условиях и песчаных почвах. **С** – демонстрирует миграцию угля в гидроморфных условиях и суглинистых почвах.

Fig. 6. Influence of fire age on morphological appearance and depth of charcoal penetration. The square shows the morphological structure of well-preserved charcoals. The rectangle characterizes the broken structure charcoals. The circles show rounded formed charcoal. The indefinite black figures show highly deformed charcoal. **A** – demonstrates the migration of coal in dry conditions and sandy soils. **B** – demonstrates the migration of coal in wet conditions and sandy soils. **C** – demonstrates the migration of coal in hydromorphic conditions and loamy soils.

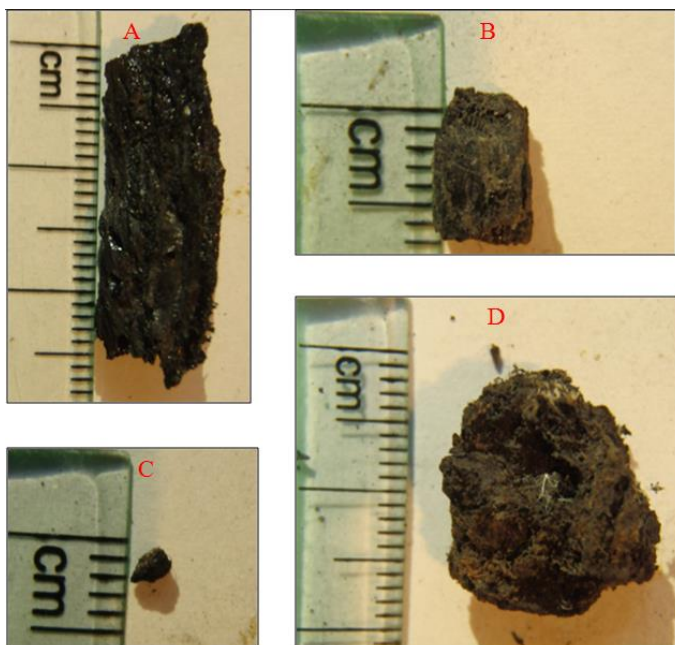


Рис. 7. Показана морфологическая структура угля в зависимости от возраста пожара и влажности подстилки. **А** – пожар возрастом 2 года, автоморфные условия. **В** – пожар возрастом 59 лет, мезоморфные условия. **С** – пожар возрастом 100 лет, гидроморфные условия. **Д** – пожар возрастом 10 лет, гидроморфные условия, криотурбации.

Fig. 7. The morphological structure of coal is shown depending on the age of the fire and the moisture content in the litter. **A** – a fire of 2 years old, automorphic conditions. **B** – a fire aged 59 years, mesomorphic conditions. **C** – a fire aged 100 years, hydromorphic conditions. **D** – a fire aged 10 years, hydromorphic conditions, cryoturbation.

Интенсивность пожара – важный параметр миграции углистых частиц. Так, в данной статье рассматривались случаи, когда напочвенный покров уничтожен пожаром. При слабых низовых пожарах, когда подстилка сгорает не полностью, углистые частицы остаются в подстилке и схемы вертикальной миграции не активизируются до начала более интенсивного пожара.

Периодичность пожаров – фактор, определяющий количе-

ство углистых частиц в почвах. В районе Печоро-Илычского заповедника, к примеру, пожары могут происходить раз в 300 лет благодаря высокому значению влажности почвы, но при этом угли остаются все это время в верхних горизонтах, как показано в барьерной модели миграции углистых частиц. Напротив, в сосняках с лишайниковым покровом пожары могут происходить каждые 10–15 лет, полностью сжигая ягель. Профиль таких почв пронизан углистыми частицами. Из-за этого при изучении миграции в сосняке ягелевом пирогенный материал легче найти, но надо помнить, что найденный уголь, с высокой вероятностью, – следствие нескольких пожаров.

ВЫВОДЫ

1. В ходе работы были разработаны следующие модели миграции углистых частиц: барьерная неравномерно-диффузная, равномерно-диффузная и турбационная.

2. С течением времени после пожара осуществляется перенос углистого материала вниз по профилю, что сопровождается его разрушением и изменением формы от прямоугольной до округлой. При этом степень разрушения угля зависит от влажности почвы.

3. Миграция углей в глубину почвенного профиля зависит от гранулометрического состава (определенного полевыми методами) – так, в песчаных почвах угли рассеяны по всему профилю, а в суглинистых почвах они сконцентрированы выше первого тяжелого горизонта.

4. Тот факт, что в сосняке с лишайником не найдено крупных углей, в соответствии с данными литературного обзора, может быть связан с дожиганием углей новыми пирогенными событиями, которые, из-за особенности ягеля высыхать в сухие годы, происходят с высокой частотой.

5. Несмотря на широкий географический охват, миграция углей укладывается в три представленные схемы во всех исследованных районах и подзонах тайги, что позволяет сделать вывод об универсальности закономерностей миграции углей.

6. Миграция углей в подзоне южной тундры существенно отличается от подзон тайги, что связано с воздействием влажности,

криотурбаций и глинистого характера горизонтов глееземов. Совокупность этих факторов разрушает углистые частицы и способствует их залеганию в непредсказуемых местах профиля.

7. Определяющим параметром климата для большинства моделей является влажность.

8. В зависимости от возраста пожара, форма углистых частиц, даже в схожих природных условиях, изменяется. В автоморфных условиях угли приобретают круглую форму и уменьшаются в размерах, в гидроморфных – интенсивно разрушаются и теряют анатомическую память.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровский М.В. Лесные почвы Европейской части России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 481 с.
2. Дымов А.А., Милановский Е.Ю., Холодов В.А. Состав и гидрофобные свойства органического вещества денсиметрических фракций почв Приполярного Урала // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1335–1345. DOI: [10.7868/s0032180x15110052](https://doi.org/10.7868/s0032180x15110052).
3. Классификация и диагностика почв России / Авторы и сост. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
4. Пучнина Л.В., Горячкин С.В., Рыков А.М., Рыкова С.Ю., Шаврина Е.В., и др. Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника (северная тайга ЕТР, Архангельская область). Биоразнообразие и георазнообразие в карстовых областях. Архангельск, 2000. 257 с.
5. Семиколенных А.А., Бовкунов А.Д., Алейников А.А. Почвы и почвенный покров таежного пояса Северного Урала (верховья реки Печора) // Почвоведение. 2013. № 8. С. 1–13. DOI: [10.7868/s0032180x1308008x](https://doi.org/10.7868/s0032180x1308008x).
6. Таргульян В.О. Теория педогенеза и эволюции почв. М.: ГЕОС, 2019. 296 с.
7. Чевычелов А.П. Пирогенез и горно-таежное континентальное гумидное автоморфное почвообразование на северо-востоке Азии (на примере Южной Якутии): Дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.27. Новосибирск: СО РАН, 1997. 281 с.
8. Bobrovsky M. V., Kupriaynov D.A., Khanina L.G. Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem

- history (Meshchera Lowlands, Russia) // Quaternary International. 2018. P. 1–13. DOI: [10.1016/j.quaint.2018.06.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.033).
9. *Bodi M.B., Mataix-Solera J., Doerr S.H., Cerdà A.* The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content // Geoderma. 2011. Vol. 160. No. 3–4. P. 599–607. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009).
10. *Bustin R.M., Guo Y.* Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals // International Journal of Coal Geology. 1999. No. 38. P. 237–260. DOI: [10.1016/S0166-5162\(98\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00025-1).
11. *Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: a review // Oecologia. 2005. Vol. 143. No. 1. P. 1–10. DOI: [10.1007/s00442-004-1788-8](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8).
12. *Collinson M.E., Steart D., Scott A.C., Glasspool I.J., Hooker J.J.* Fire and episodic runoff and deposition at the Paleocene-Eocene boundary // Journal of the Geological Society. 2007a. No. 167. P. 87–97. DOI: [10.1144/0016-76492005-185](https://doi.org/10.1144/0016-76492005-185).
13. *Clark J.S.* Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition and sampling // Quaternary Research. 1988. No. 30. P. 67–80. DOI: [10.1016/0033-5894\(88\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9).
14. *Clark J.S., Patterson W.A.* Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the palaeo record // Sediment Records of Biomass Burning and Global Change. NATO Advanced Science Institutes. 1997. Series I. Vol. 51. P. 23–48. DOI: [10.1007/978-3-642-59171-6_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59171-6_3).
15. *Carcaillet C., Thimon M.* Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data // Review of Palaeobotany and Palynology. 1996. Vol. 91. No. 1–4. P. 399–416. DOI: [10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7).
16. *Jones T.P., Scott A.C., Cope M.* Reflectance measurements against temperature of formation for modern charcoals and their implications for the study of fusain // Bulletin de la Société Géologique de France. 1991. No. 162. P. 193–200.
17. *Komarek E.V., Komarek B.B., Carlisle T.C.* The ecology of smoke particulates and charcoal residue from forest and grassland fires: a preliminary atlas. Miscellaneous Publication 3. Tall Timbers Research Station. Tallahassee, 1973.
18. *Lupia R.* Palaeobotanical data from fossil charcoal: an actualistic study of seed plant reproductive structures // Palaios. 1995. No. 10. P. 465–477. DOI: [10.2307/3515048](https://doi.org/10.2307/3515048).

19. *Moody J.A., Martin D.A.* Hydrological and sedimentologic response of two burned watersheds in Colorado // Water-Resources Investigation Report. Series Report Number 2001-4122. DOI: [10.3133/wri014122](https://doi.org/10.3133/wri014122).
20. *Nichol G.J., Cripps J., Collinson M.E., Scott A.C.* Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications // Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology. 2000. No. 164. P. 43–56. DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00174-7).
21. *Prior J., Alvin K.L.* Structural changes on charring woods of *Dichrostachys* and *Salix* from Southern Africa // International Association of Wood Anatomists Bulletin. 1983. No. 4. P. 197–206. DOI: [10.1163/22941932-90000782](https://doi.org/10.1163/22941932-90000782).
22. *Pyne S.J., Andrews P.L., Laven R.D.* Introduction to Wildland Fire. New York: J. Wiley and Sons, 1996. 808 p.
23. *Sander M., Pignatello J.J.* Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: insights drawn from single-solute and bi-solute competitive experiments // Environmental science & technology. 2005. Vol. 39. No. 6. P. 1606–1615. DOI: [10.1021/es049135l](https://doi.org/10.1021/es049135l).
24. *Scott A.C.* The Pre-Quaternary history of fire // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2000a. Vol. 164. P. 281–329. DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00192-9](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00192-9).
25. *Scott A.C.* Fossil Plants. In: The Oxford Companion to the Earth. Oxford: Oxford University Press, 2000b. P. 364–371.
26. *Scott A.C.* Preservation by fire. In: Palaeobiology II. Oxford: Blackwell Science Publ., 2001. P. 277–280.
27. *Scott A.C.* Forest Fire in the Fossil Record. In: Fire Effects on Soils and Restoration Strategies. New Hampshire: Science Publishers Inc., 2009. P. 1–37.
28. *Scott A.C., Jones T.P.* Microscopical observations of recent and fossil charcoal // Microscopy and Analysis. 1991. No. 25. P. 13–15.
29. *Shakesby R.A., Doerr S.H.* Wildfire as a hydrological and geomorphological agent // Earth-Science Reviews. 2006. No. 74. P. 269–307. DOI: [10.1016/j.earscirev.2005.10.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.006).
30. *Vaughan A., Nichols G.J.* Controls on the deposition of charcoal: implications for sedimentary accumulations of fusain // Journal of Sedimentary Research. 1995. Vol. 65A. No. 1. P. 129–135. DOI: [10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d](https://doi.org/10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d).

REFERENCES

1. *Bobrovskii M.V., Lesnye pochvy Evropeiskoi chasti Rossii: bioticheskie i antropogennye faktory formirovaniya* (Forest soils of the European part of

Russia: biotic and anthropogenic factors of formation), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010, 481 p.

2. Dymov A.A., Milanovskii E.Yu., Kholodov V.A., Sostav i gidrofobnye svoystva organicheskogo veshchestva densimetricheskikh fraktsii pochv Pripolyarnogo Urala (Composition and hydrophobic properties of organic matter of densimetric fractions of soils of the Subpolar Urals), *Pochvovedenie*, 2015, No. 11, pp. 1335–1345. DOI: [10.7868/s0032180x15110052](https://doi.org/10.7868/s0032180x15110052).

3. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oikumena, 2004, p. 342.

4. Puchnina L.V., Goryachkin S.V., Rykov A.M., Rykova S.Yu., Shavrina E.V. i dr., *Struktura i dinamika prirodnnykh komponentov Pinezhskogo zapovednika (severnaya taiga ETR, Arkhangel'skaya oblast')* (The structure and dynamics of the natural components of the Pinezhsky Reserve (northern taiga of the ETR, Arkhangelsk region)), *Bioraznoobrazie i georaznoobrazie v karstovykh oblastyakh, Arkhangel'sk*, 2000, 257 p.

5. Semikolennykh A.A., Bovkunov A.D., Aleinikov A.A., *Pochvy i pochvennyi pokrov taezhnogo poyasa Severnogo Urala (verkhov'ya reki Pechora)* (Soils and soil cover of the taiga zone of the Northern Urals (upper reaches of the Pechora River)), *Pochvovedenie*, 2013, No. 8, p. 1–13, DOI: [10.7868/s0032180x1308008x](https://doi.org/10.7868/s0032180x1308008x).

6. Targul'yan V.O., *Teoriya pedogeneza i evolyutsii pochv* (Theory of pedogenesis and soils evolution), Moscow: GEOS, 2019, 296 p.

7. Chevychelov A.P., *Pirogenез i gorno-taezhnoe kontinental'noe gumidnoe avtomorfnoe pochvoobrazovanie na severo-vostoke Azii (na primere Yuzhnoi Yakutii): Diss. ... kand. boil. nauk: 03.00.27*, (Pyrogenesis and mountain taiga continental humid automorphic soil formation in northeast Asia (as exemplified in South Yakutia): Cand. boil. sci. thesis), Novosibirsk: SO RAN, 1997, 281 p.

8. Bobrovsky M.V., Kupriaynov D.A., Khanina L.G., *Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera Lowlands, Russia)*, *Quaternary International*, 2018, pp. 1–13, DOI: [10.1016/j.quaint.2018.06.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.033).

9. Bodí M.B., Mataix-Solera J., Doerr S.H., Cerdà A., The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content, *Geoderma*, 2011, Vol. 160, No. 3–4, pp. 599–607, DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009).

10. Bustin R.M., Guo Y., Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology*, 1999, No. 38, pp. 237–260, DOI: [10.1016/S0166-5162\(98\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00025-1).

11. Certini G., Effects of fire on properties of forest soils: a review, *Oecologia*, 2005, Vol. 143, No. 1, pp. 1–10, DOI: [10.1007/s00442-004-1788-8](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8).
12. Collinson M.E., Steart D., Scott A.C., Glasspool I.J., Hooker J.J., Fire and episodic runoff and deposition at the Paleocene-Eocene boundary, *Journal of the Geological Society*, 2007a, No. 167, pp. 87–97, DOI: [10.1144/0016-76492005-185](https://doi.org/10.1144/0016-76492005-185).
13. Clark J.S., Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition and sampling, *Quaternary Research*, 1988, No. 30, pp. 67–80, DOI: [10.1016/0033-5894\(88\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9).
14. Clark J.S., Patterson W.A., Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the palaeo record, *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*, NATO Advanced Science Institutes, 1997, Series I, Vol. 51, pp. 23–48, DOI: [10.1007/978-3-642-59171-6_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59171-6_3).
15. Carcaillet C., Thinin M., Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1996, Vol. 91, No. 1–4, pp. 399–416, DOI: [10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7).
16. Jones T.P., Scott A.C., Cope M., Reflectance measurements against temperature of formation for modern charcoals and their implications for the study of fusain, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1991, No. 162, pp. 193–200.
17. Komarek E.V., Komarek B.B., Carlisle T.C., *The ecology of smoke particulates and charcoal residue from forest and grassland fires: a preliminary atlas*, Miscellaneous Publication 3, Tall Timbers Research Station, Tallahassee, 1973.
18. Lupia R., Palaeobotanical data from fossil charcoal: an actualistic study of seed plant reproductive structures, *Palaos*, 1995, No. 10, pp. 465–477, DOI: [10.2307/3515048](https://doi.org/10.2307/3515048).
19. Moody J.A., Martin D.A., Hydrological and sedimentologic response of two burned watersheds in Colorado, *Water-Resources Investigation Report*, Series Report Number 2001-4122, DOI: [10.3133/wri014122](https://doi.org/10.3133/wri014122).
20. Nichol G.J., Cripps J., Collinson M.E., Scott A.C., Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications, *Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2000, No. 164, pp. 43–56, DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00174-7).
21. Prior J., Alvin K.L., Structural changes on charring woods of *Dichrostachys* and *Salix* from Southern Africa, *International Association of Wood Anatomists Bulletin*, 1983, No. 4, pp. 197–206, DOI: [10.1163/22941932-90000782](https://doi.org/10.1163/22941932-90000782).

22. Pyne S.J., Andrews P.L., Laven R.D. Introduction to Wildland Fire. New York: J. Wiley and Sons, 1996, 808 p.
23. Sander M., Pignatello J.J., Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: insights drawn from single-solute and bi-solute competitive experiments, *Environmental science & technology*, 2005, Vol. 39, No. 6, pp. 1606–1615, DOI: [10.1021/es049135l](https://doi.org/10.1021/es049135l).
24. Scott A.C., The Pre-Quaternary history of fire, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000a, Vol. 164, pp. 281–329, DOI: [10.1016/s0031-0182\(00\)00192-9](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(00)00192-9).
25. Scott A.C., Fossil Plants, In: *The Oxford Companion to the Earth*, Oxford: Oxford University Press, 2000b, pp. 364–371.
26. Scott A.C., Jones T.P., Microscopical observations of recent and fossil charcoal, *Microscopy and Analysis*, 1991, No. 25, pp. 13–15.
27. Scott A.C., Preservation by fire, In: *Palaeobiology II*, Oxford: Blackwell Science Publ., 2001, pp. 277–280.
28. Scott A.C., Forest Fire in the Fossil Record, In: *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*, New Hampshire: Science Publishers Inc., 2009, pp. 1–37.
29. Shakesby R.A., Doerr S.H., Wildfire as a hydrological and geomorphological agent, *Earth-Science Reviews*, 2006, No. 74, pp. 269–307, DOI: [10.1016/j.earscirev.2005.10.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.006).
30. Vaughan A., Nichols G.J., Controls on the deposition of charcoal: implications for sedimentary accumulations of fusain, *Journal of Sedimentary Research*, 1995, Vol. 65A, No. 1, pp. 129–135, DOI: [10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d](https://doi.org/10.1306/d426804a-2b26-11d7-8648000102c1865d).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-146-172



Ссылки для цитирования:

Грубина П.Г., Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю. Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 146-172. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-146-172

Cite this article as:

Grubina P.G., Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 146-172, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-146-172

Благодарность:

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ 18-016-0052/19 и РНФ (№ 20-67-46017). Авторы выражают благодарность сотрудникам Почвенного института им. В.В. Докучаева: Щепотьеву В.Н., Вернюку Ю.И., Шарычеву Д.Е., Шишконоковой Е.А., – за помощь в сборе полевых данных. Сбор полевых данных и лабораторные анализы почвенных образцов проведены с использованием оборудования ЦКП “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) project No. 18-016-0052/19 and the Russian Science Foundation (No. 20-67-46017). The authors express their gratitude to the research staff of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute: Shchepotiev V.N., Vernyuk Yu.I., Sharychev D.E., Shishkonakova E.A., – for assistance in field data collection. Field data collection and laboratory analyses of soil samples were carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Functions and Properties of Soils and Soil Cover” of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв

© 2020 г. П. Г. Грубина^{1*}, И. Ю. Савин^{1,2**},
Е. Ю. Прудникова^{1,2***}

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

*<https://orcid.org/0000-0001-6325-4604>, e-mail: grubina_pg@esoil.ru.

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

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

***<https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: prudnikova_eyu@esoil.ru.

Поступила в редакцию 27.06.2020, принята к публикации 17.12.2020

Резюме: Проведен анализ возможности использования результатов тепловой съемки для детектирования параметров плодородия серых лесных и аллювиальных пахотных почв на примере ключевого участка в Тульской области. Совместно с отбором 25 образцов почв из слоя 0–10 см проводилась съемка открытой поверхности почв с использованием тепловизора FLIR VUE 512 и измерение спектральной отражательной способности почв. По результатам корреляционного анализа было установлено, что наиболее тесные связи наблюдаются с такими параметрами плодородия почв: содержание гумуса, азота, обменных магния и калия. Коэффициент корреляции между содержанием гумуса и отражением в видимой и ближней ИК-областях, а также со средним значением показаний тепловизора превышает 0.81. В разных диапазонах видимого спектра корреляция отражения с содержанием обменного магния и калия ниже, чем в тепловой области, где коэффициент корреляции с содержанием обменного магния составляет 0.81, а с содержанием обменного калия – 0.65. Построены степенные регрессионные уравнения для детектирования по отражению в тепловой области спектра таких параметров плодородия почв как содержание гумуса ($R^2 = 0.74$), обменного калия ($R^2 = 0.68$) и обменного магния ($R^2 = 0.72$). Регрессии, полученные с данными тепловизора и с данными отражения в видимом и ближнем ИК-диапазонах, близки по качеству для детектирования содержания гумуса и обменного калия, а для детектирования обменного магния немного выше. Полученные результаты показывают, что тепловая съемка применима для

детектирования наиболее значимых параметров плодородия почв тестового поля и может быть использована в качестве основы для их оперативного дистанционного мониторинга.

Ключевые слова: тепловизор, ИК-диапазон, агрохимические показатели плодородия почв, спектральная отражательная способность почв, Тульская область.

The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility

P. G. Grubina^{1*}, I. Yu. Savin^{1,2**}, E. Yu. Prudnikova^{1,2***}

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

* <https://orcid.org/0000-0001-6325-4604>, e-mail: grubina_pg@esoil.ru.

²Ecological Faculty of RUDN University,

8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation,

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

*** <https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: prudnikova_eyu@esoil.ru.

Received 27.06.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: The analysis of the possibility of using the thermal infrared images for detecting soil fertility parameters of gray forest and alluvial arable soils was carried out by the example of a test filed in Tula region of Russia. Together with the sampling of 25 soil probes from the 0–10 cm layer, the open surface of the soil was photographed using a FLIR VUE 512 thermal imager, and the spectral reflectance of the soil was measured. According to the results of the correlation analysis, it was found that the closest correlations for thermal images are observed with the following parameters of soil fertility: the content of humus, nitrogen, exchangeable magnesium and potassium. The correlation coefficient between the humus content and the reflectance in the visible and near IR-regions, as well as with the average value of the reflectance in thermal band exceeds 0.81. In different diapasons of the visible spectrum, the spectral reflectance correlation with the content of exchangeable magnesium and potassium is lower than in the thermal band, where the correlation coefficient with the content of exchangeable magnesium is 0.81, and with the content of exchangeable potassium is 0.65. Power regression equations were constructed for detecting such soil fertility parameters as humus content ($R^2 = 0.74$), exchangeable potassium content ($R^2 = 0.68$), and

exchangeable magnesium content ($R^2 = 0.72$) by reflection in the thermal band of the spectrum. The regressions obtained with the thermal imager data and with the spectral reflectance data in the visible and near IR-bands are similar in quality for detecting humus and exchangeable potassium content, while for detecting exchangeable magnesium content they are a bit higher. The obtained results show that thermal infrared images are applicable for detecting the most significant parameters of soil fertility in the test field and can be used as a basis for their real-time remote sensing monitoring.

Keywords: FLIR, infrared band, agrochemical soil fertility properties, spectral reflectivity of soil, Tula region.

ВВЕДЕНИЕ

Урожайность сельскохозяйственных культур во многом определяется состоянием почв и наличием в них доступных питательных веществ. Именно поэтому в сельскохозяйственном производстве важное значение имеет почвенное и агрохимическое обследование земель, результатом которого являются карты параметров почвенного плодородия. Картографирование параметров почвенного плодородия происходит на основе данных полевых работ и лабораторных исследований образцов почв. Работы проводятся в соответствии с утвержденными методиками ([Методические указания..., 2003](#)). Большая трудоемкость подобных работ и достаточно сильная изменчивость параметров плодородия почв (NPK, pH, содержание гумуса) приводят к тому, что получить оперативно подобные данные для больших территорий практически невозможно и очень затратно.

На протяжении последних десятилетий ведутся разработки в области создания новых методов картографирования параметров плодородия почв, основанных на использовании данных дистанционного зондирования ([Симакова, Савин, 1998](#)). Эти методы позволяют оперативно картографировать некоторые из параметров плодородия почв, но не все, не всегда и не везде ([Савин, Симакова, 2012](#)).

Исследования последних лет показали, что на основе анализа спектральной отражательной способности почв и данных дистанционного зондирования может быть детектирован широкий диапазон почвенных свойств. Выявлено, что для детектирования

свойств почв лучше всего подходит анализ отражения света в видимом (VIS), ближнем инфракрасном (NIR) и среднем инфракрасном (MIR) диапазонах спектра.

Так, по данным Soriano-Disla с коллегами ([Soriano-Disla et al., 2014](#)), многие физические и химические свойства почв (влажность, содержание песка и глины, фракции органического углерода, содержание неорганического углерода, обменных Ca и Mg, общего углерода, pH) уверенно детектируется в диапазонах MIR и NIR, а биологические свойства почв – в VIS-NIR диапазоне.

В статье Rossel с соавторами ([Rossel et al., 2006](#)) на примере тестового участка, расположенного в западной части Нового Южного Уэльса (Австралия), показано, что такие свойства почв как влажность, гранулометрический состав, содержание углерода в почве (C), емкость катионного обмена, кальций и магний (обменный), общий азот (N), pH, концентрация металлов/металлоидов, микробиологическая активность также могут быть успешно детектированы на основе анализа данных о спектральном отражении почв.

В работе ([Чинилин, Савин, 2018](#)) показаны возможности детектирования минералогического состава и вертикальной неоднородности почвообразующих пород по данным отражательной способности почв в видимом диапазоне спектра.

С помощью VIS-NIR диапазона ([Coutinho et al., 2019](#)) было спрогнозировано содержание калия и фосфора в почве, однако данные MIR диапазона не дали достоверных результатов. Содержание азота не было достоверно определено ни одним из этих методов. Объектом исследования были две почвы с низким естественным плодородием и контрастным гранулометрическим составом (глинистые и песчаные почвы) из штата Сан-Паулу, Бразилия.

Приведенные примеры показывают, что успешность детектирования отдельных свойств почв зависит как от региона работ (специфика почв), так и от диапазона используемых длин волн ([Савин, 2015](#)).

Одним из перспективных источников данных о почвенных свойствах может быть зондирование в тепловой области спектра. Это направление исследований быстро развивается в последние

годы в связи с решением ряда технических проблем, связанных с оперативным получением подобных данных для больших территорий.

Уже достаточно широко продемонстрированы возможности использования данных тепловой съемки для детектирования влажности и температуры почв ([Sanchez et al., 2011](#); [Анциферов, 2012](#); [Palombo et al., 2019](#)).

Известно, что влажность почв во многих случаях хорошо коррелирует с другими свойствами почв, что создает предпосылки для использования данных MIR диапазона и для их детектирования и мониторинга. Работы в этом направлении уже есть, но их пока немного. Так, в научных публикациях показаны возможности детектирования содержания гумуса и органического вещества почв ([Ma et al., 2016](#); [Dhawale et al., 2016](#)), минералогического состава ([Xia et al., 2018](#)), засоленности ([Csillag et al., 1993](#)) по данным этого диапазона спектра. Однако этих данных все еще не достаточно для получения надежных результатов.

В предлагаемой статье приведены результаты анализа возможностей использования данных тепловой съемки для детектирования параметров плодородия почв на примере ключевого участка на пашне в северной лесостепи Среднерусской возвышенности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является почвенный покров тестового поля Почвенного института им. В.В. Докучаева, расположенного в Ясногорском районе Тульской области. Площадь поля составляет почти 90 га (рис. 1).

Рельеф территории исследований широковолнистый с преобладающими высотами 250 м. Присутствует расчленение овражно-балочной и речной сетью. На территории поля, охватывающего среднюю и нижнюю части мезосклона рельефа и верхнюю пойму реки Беспута, хорошо выражен микрорельеф, обусловленный протеканием эрозионных процессов и антропогенной деятельностью и представленный в основном промоинами и эрозионными врезамми ([Редькин и др., 1996](#); [Сорокина, 2003](#)).

Почвообразующими породами являются коричнево-бурые

пылеватые суглинки, которые распространены повсеместно на склоне. В нижних частях склона местами встречаются делювиальные отложения. Постилаются покровные отложения коричневатобурым опесчаненным валунным суглинком ([Ратников, 1960](#)).

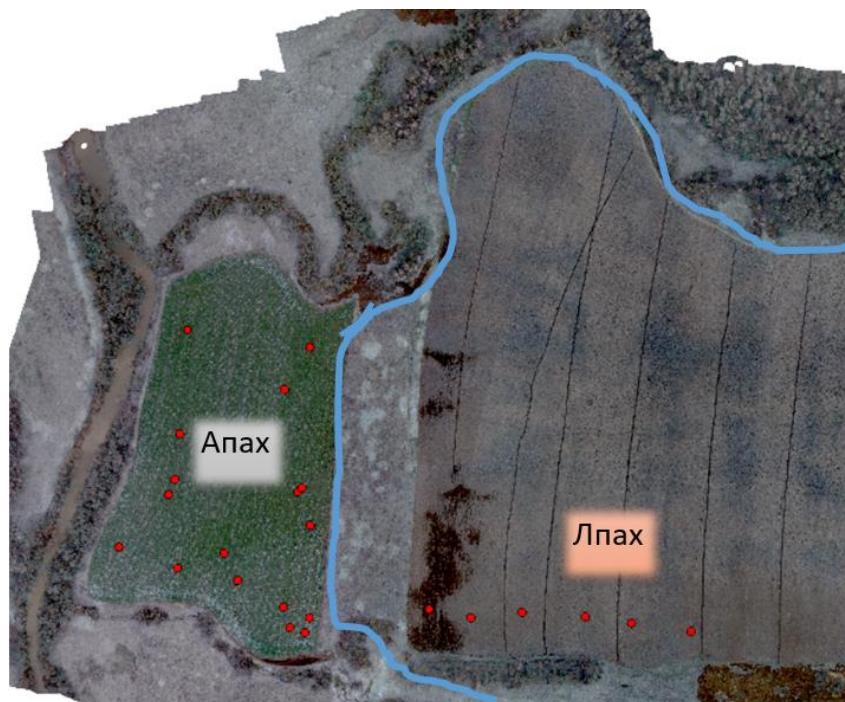


Рис. 1. Тестовое поле. Расположение точек полевого опробования показано красным (Апах – часть поля с преобладанием аллювиальных пахотных почв, Лпах – с преобладанием серых лесных пахотных почв), ареалы разделены синей линией (съемка с БПЛА – Ю.И. Вернук, 2018).

Fig. 1. Test field. The location of testing points on the field is shown by red dots (Апах – part of a field with predominance of alluvial arable soils, Лпах – with predominance of gray forest arable soils), different soils areas are separated by the blue line, (survey with UAV – Yu.I. Vernyk, 2018).

На участке выявлено два типа почв: аллювиальные пахотные на пойме и серые лесные слабо- и среднеэродированные па-

хотные почвы на склоне. Свойства пахотных горизонтов почв поля приведены в таблице 1.

Серая лесная почва характеризуется достаточно низким содержанием гумуса, повышенным содержанием фосфора, средним содержанием калия и низким – азота ([Ягодин, Жуков, 2002](#)). Реакция среды нейтральная.

Физические свойства пахотных горизонтов почв поля имеют следующую специфику: содержание агрономически ценных агрегатов составляет 71.9%, что является отличным агрегатным состоянием ([Вадюнина, Корчагина, 1985](#)), о чем также свидетельствует и коэффициент структурности 3 мм (> 1.5 мм). Общая порозность составляет 55%, что также является отличным показателем ([Качинский, 1965](#)). Плотность почвы составляет 1.16 г/см³ (соответствует градации “уплотненная” по Долгову С.И. ([Шеин, 2005](#))).

Полевые исследования проводились в августе и сентябре 2018 г. после уборки посевов. Всего было заложено 25 точек опробования (рис. 1).

Отбор образцов осуществлялся из пахотного горизонта. В ИЛЦ Почвенного института им. В.В. Докучаева были выполнены анализы следующих основных параметров плодородия почв: содержания гумуса, pH почвы (водн. и сол.), обменных оснований по Шолленбергеру (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), P_2O_5 подвижного (по Кирсанову), K_2O обменного (по Масловой), общего азота (по стандартным методикам).

Одновременно с отбором образцов почв проводилась съемка свежепроборонованной открытой поверхности почвы с высоты 130–150 см в трехкратной повторности с использованием тепловизора FLIR VUE 512, работающего в ИК диапазоне 7.5 ~ 13.5 мкм (<https://www.flir.com/products/vue-pro/>) (рис. 2).

Параллельно происходило измерение спектральной отражательной способности (СОС) поверхности почв с высоты 15–20 см в пятикратной повторности с использованием спектрорадиометра HandHeld-2 (ASD, USA), определяющего отражательные свойства почв в диапазоне 350–1050 нм (<https://www.malvernpanalytical.com/en/support/product-support/asd-range/fieldspec-range/handheld-2-hand-held-vnir-spectroradiometer>).

Таблица 1. Свойства пахотных горизонтов почв тестового поля

Table 1. Properties of arable horizons of the soil of the test field

Почва	рН		Фосфор подв. (P ₂ O ₅), мг/кг	Калий обмен- ный (K ₂ O), мг/кг	Азот общий, %	Гумус, %	Обменные катионы (по Шолленбергеру), мг-экв/100г			
	H ₂ O	KCl					K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Серая лесная пахотная	6.52	5.47	138.30	91.52	0.22	3.25	0.43	0.03	19.11	1.42
Аллювиаль- ная пахотная	7.55	6.13	224.29	82.46	0.28	4.05	0.34	0.11	51.70	3.35

Тепловые изображения были загружены в пакет прикладных программ ILWIS (<https://www.itc.nl/ilwis/download/ilwis33/>), с использованием которого для каждого изображения проводилось количественное определение величины отражения энергии поверхностью почвы в тепловом диапазоне. Определялось среднее отражение, минимальная и максимальная величина, медианное и модальное значение отражения открытой поверхности почв.

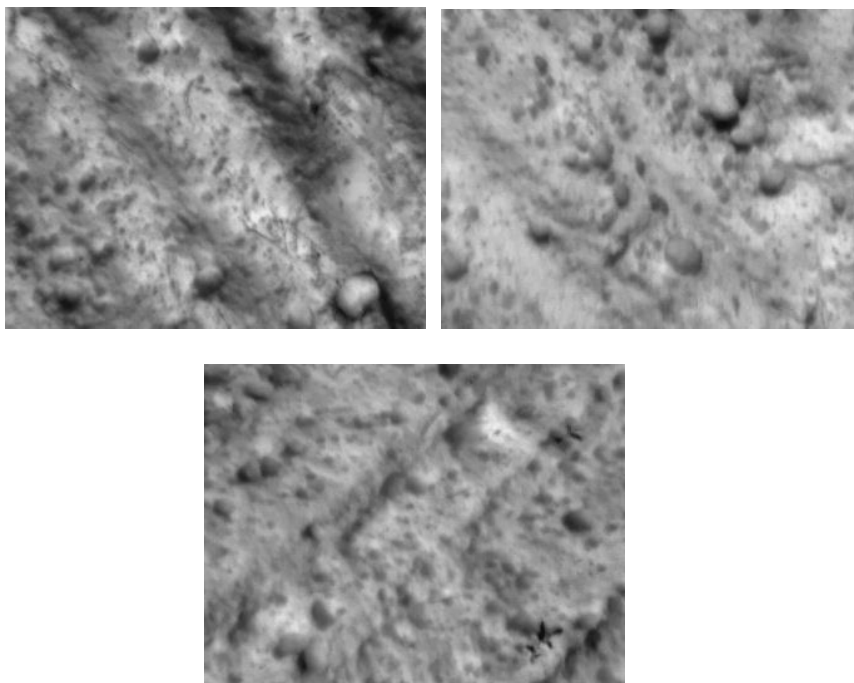


Рис. 2. Примеры тепловых изображений открытой поверхности почв тестового поля.

Fig. 2. Examples of thermal images of open soil surfaces of the test field.

Статистическую обработку данных – расчет средних значений, доверительных интервалов, оценку статистической значимости различий ($t_{0.05}$) – проводили с использованием пакета stats в

среде R (<https://www.r-project.org/>).

Далее проводился регрессионный анализ. Пороговым значением для определения достоверности моделей являлся скорректированный $R^2 > 0.65$. Далее все достоверные модели проходили дополнительную проверку с помощью кросс-валидации методом контроля по отдельным объектам (leave one out cross validation) с использованием библиотеки CARET.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные фактические данные приведены в таблице 2. В таблице 3 приведены результаты корреляционного анализа между приведенными в таблице 2 параметрами. Из таблицы 3 следует, что хорошо коррелируют между собой все показатели, полученные с помощью ИК камеры за исключением стандартного отклонения, которое не показало надежной корреляции ни с одним из рассматриваемых параметров. Также достаточно хорошо коррелируют между собой величины спектральной отражательной способности в анализируемых диапазонах съемки. Более того, установлена хорошая корреляция между параметрами, определяемыми по данным тепловой камеры и по данным о спектральной отражательной способности почв, что можно объяснить тем, что различия в цвете почв (отражении в видимой области спектра) приводят к разнице в температуре поверхности, что и фиксирует тепловизор.

Из параметров плодородия почв высокая корреляция отмечается между величинами pH водного и солевого растворов, между содержанием гумуса и азота, а также между содержанием доступного и обменного калия.

При анализе корреляции между параметрами плодородия почв и их отражательной способностью в разных диапазонах выявляются следующие закономерности.

Наиболее высокие коэффициенты корреляции отмечаются для содержания гумуса. Эта величина лучше всего коррелирует с отражением в ближней инфракрасной области спектра.

Таблица 2. Исходные фактические данные
Table 2. Initial evidence

№ точки	flir_min	flir_max	flir_av	flir_mode	flir_std	pHvod	humus	pHsol	P205	K2O	N	K+	Na+	Ca2+	Mg2+	400_500	500_600	600_700	700_800	800_900	400_900
1	38	135	77	85	28	8.26	5.01	6.87	74.14	90.29	0.37	0.46	0.48	165.82	1.91	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08
2	26	113	65	69	24	8.18	6.11	5.81	176.59	119.63	0.45	0.43	0.13	157.95	2.15	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.06
3	28	98	61	64	20	8.25	6.12	6.85	93.01	128.62	0.41	0.51	0.16	153.45	2.28	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.05
4	29	100	62	65	20	7.35	6.54	5.93	187.37	108.65	0.43	0.41	0.29	42.34	2.64	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05
5	41	118	76	80	22	8.09	4.43	6.77	306.00	70.69	0.29	0.34	0.07	54.93	2.14	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.08
6	64	151	102	103	22	8.04	2.79	6.47	311.39	86.32	0.18	0.30	0.00	20.12	3.80	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.14
7	72	151	107	109	21	8.51	1.89	6.89	300.60	66.20	0.14	0.23	0.12	30.85	6.07	0.09	0.13	0.16	0.20	0.24	0.18
8	73	134	100	104	17	7.19	3.27	5.85	206.24	82.60	0.21	0.28	0.04	19.35	3.69	0.07	0.09	0.12	0.14	0.17	0.13
9	60	134	93	97	21	7.05	2.84	5.58	176.59	93.18	0.23	0.35	0.10	21.81	3.53	0.07	0.09	0.11	0.14	0.17	0.13
10	75	151	114	113	20	7.88	2.05	6.49	184.68	74.45	0.17	0.28	0.02	21.07	4.28	0.07	0.10	0.13	0.16	0.19	0.14
11	60	149	105	104	25	6.72	2.74	5.25	168.50	74.78	0.20	0.32	0.06	15.06	2.31	0.08	0.10	0.13	0.16	0.20	0.15
12	72	178	123	124	29	8.04	2.74	6.65	370.70	69.41	0.21	0.30	0.16	34.30	10.32	0.07	0.10	0.13	0.15	0.19	0.14
13	65	163	113	114	25	8.15	2.21	6.64	346.44	72.25	0.21	0.28	0.11	25.77	5.89	0.07	0.09	0.12	0.15	0.18	0.13
14	66	131	96	99	18	6.43	3.05	5.17	146.93	78.20	0.21	0.36	0.11	20.66	2.44	0.06	0.07	0.09	0.11	0.14	0.10
15	53	123	81	84	19	6.16	5.11	5.03	130.76	54.04	0.34	0.26	0.05	24.38	2.18	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.09
16	61	119	86	89	16	6.24	3.59	5.11	165.80	65.66	0.25	0.30	0.03	20.09	1.97	0.06	0.07	0.09	0.11	0.14	0.10
17	53	123	76	84	19	7.27	6.43	6.07	283.08	74.94	0.32	0.31	0.04	33.59	1.50	0.05	0.05	0.06	0.08	0.10	0.08
18	42	123	70	78	21	8.05	6.01	6.83	408.44	74.44	0.33	0.31	0.06	69.01	1.28	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.08
19	43	109	80	76	19	7.54	2.85	6.44	0.00	129.85	0.20	0.66	0.02	19.73	0.90	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.08
20	26	114	80	73	25	6.50	2.69	5.45	260.16	109.69	0.19	0.49	0.04	18.10	1.23	0.05	0.07	0.08	0.10	0.13	0.09
21	38	106	77	73	20	6.41	2.00	5.12	128.06	80.61	0.16	0.36	0.02	16.94	1.67	0.05	0.06	0.08	0.10	0.13	0.09
22	38	115	76	75	20	6.05	3.53	5.07	109.19	72.17	0.23	0.33	0.03	17.82	1.31	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.08
23	39	103	74	72	18	6.13	3.95	5.05	98.40	73.81	0.21	0.34	0.03	17.94	1.50	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.07
24	42	104	73	72	17	6.49	4.48	5.68	95.71	83.00	0.30	0.39	0.04	24.14	1.92	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.06

свойство почв	значения тепловизора	средние значения спектрального отражения в диапазонах, нм
pH _{vod} – pH водный	Flir_min – минимальное значение	500_600 – 500–600 нм
Humus – содержание гумуса, %	Flir_max – максимальное значение	600_700 – 600–700 нм
pH _{sol} – pH солевой	Flir_av – среднее значение	700_800 – 700–800 нм
P ₂ O ₅ – фосфор подвижный, мг/кг	Flir_mode – модальное значение	800_900 – 800–900 нм
K ₂ O – калий обменный, мг/кг	Flir_std – стандартное отклонение	400_900 – 400–900 нм
N – азот общий, %		
K ⁺ – обменный катион калия, мг-экв/100г		
Na ⁺ – обменный катион натрия, мг-экв/100г		
Ca ²⁺ – обменный катион кальция, мг-экв/100г		
Mg ²⁺ – обменный катион магния, мг-экв/100г		

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа

Table 3. Results of the correlation analysis

	flir_min	flir_max	flir_av	flir_mode	flir_std	pHvod	humus	pHsol	P205	K2O	N	K+	Na+	Ca2+	Mg2+	400_500	500_600	600_700	700_800	800_900	400_900
flir_min	1.00																				
flir_max	0.80	1.00																			
flir_av	0.89	0.92	1.00																		
flir_mode	0.93	0.96	0.98	1.00																	
flir_std	-0.05	0.54	0.30	0.31	1.00																
pHvod	0.11	0.41	0.19	0.28	0.51	1.00															
humus	-0.66	-0.62	-0.82	-0.71	-0.13	0.07	1.00														
pHsol	0.11	0.36	0.16	0.25	0.43	0.94	0.05	1.00													
P205	0.36	0.57	0.41	0.47	0.37	0.45	-0.10	0.44	1.00												
K2O	-0.59	-0.46	-0.46	-0.50	0.09	0.26	0.27	0.20	-0.38	1.00											
N	-0.60	-0.47	-0.70	-0.58	0.06	0.21	0.93	0.15	-0.14	0.38	1.00										
K+	-0.65	-0.53	-0.52	-0.58	0.08	0.06	0.22	0.10	-0.56	0.87	0.29	1.00									
Na+	-0.24	0.06	-0.17	-0.06	0.50	0.41	0.34	0.38	-0.11	0.23	0.52	0.24	1.00								
Ca2+	-0.49	-0.20	-0.46	-0.35	0.38	0.55	0.59	0.44	-0.14	0.48	0.74	0.38	0.66	1.00							
Mg2+	0.64	0.81	0.77	0.79	0.47	0.45	-0.46	0.41	0.53	-0.29	-0.31	-0.44	0.14	-0.12	1.00						
400_500	0.85	0.87	0.90	0.91	0.26	0.30	-0.76	0.25	0.47	-0.42	-0.67	-0.54	-0.14	-0.38	0.64	1.00					
500_600	0.84	0.85	0.92	0.90	0.26	0.29	-0.80	0.24	0.45	-0.40	-0.71	-0.52	-0.17	-0.41	0.67	0.99	1.00				
600_700	0.84	0.85	0.92	0.90	0.24	0.25	-0.82	0.21	0.44	-0.41	-0.74	-0.52	-0.20	-0.44	0.67	0.98	1.00	1.00			
700_800	0.84	0.83	0.93	0.89	0.21	0.20	-0.84	0.17	0.41	-0.43	-0.77	-0.53	-0.23	-0.48	0.66	0.97	0.99	1.00	1.00		
800_900	0.85	0.81	0.93	0.89	0.17	0.13	-0.86	0.11	0.40	-0.47	-0.81	-0.55	-0.27	-0.53	0.64	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	
400_900	0.86	0.85	0.93	0.91	0.21	0.21	-0.82	0.18	0.44	-0.45	-0.75	-0.55	-0.22	-0.47	0.66	0.98	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00

Примечание. Расшифровка сокращений приведена в таблице 2, зеленым выделены наиболее высокие коэффициенты корреляции.

Коэффициент корреляции превышает значение 0.8 для всех рассматриваемых диапазонов видимой области спектра, а также для среднего значения отражения, полученного с использованием тепловизора. Связь между содержанием гумуса и всеми параметрами отражения обратная, что логично: более высокое содержание гумуса приводит к падению отражательной способности в видимом диапазоне спектра. А более высокая температура более темной поверхности в солнечный день приводит к повышенной потере влаги из поверхностных слоев почвы, что приводит к повышению отражения в среднем ИК диапазоне, и, как следствие, к проявлению обратной зависимости.

Содержание доступного азота лучше всего коррелирует с отражением в ближней инфракрасной области спектра ($K_{\text{кор}}$ -0.81). Корреляция с данными, полученными с использованием тепловизора, оказалась не очень высокой ($K_{\text{кор}}$ около -0.5 – -0.7). Закономерности, полученные для азота, очень схожи с таковыми, полученными для гумуса, что также логично с учетом тесной связи этих параметров плодородия между собой.

Из остальных параметров плодородия значимой корреляцией с отражательными свойствами поверхности почв отличается содержание магния и калия (табл. 3). Причем разница коэффициентов корреляции между этими показателями и разными параметрами отражательной способности почв не очень велика. Немного больше коэффициент корреляции между содержанием магния и значением максимума отражения, полученного с использованием тепловизора ($K_{\text{кор}}$ +0.81). Корреляция с отражением в видимой области спектра была ниже, а в ближней инфракрасной области спектра – еще ниже. Это хорошо согласуется с установленным ранее фактом большего влияния минеральной части почв на отражение в более коротковолновой области спектра, а органики – в более длинноволновой области ([Islam et al., 2003](#)).

Содержание поглощенного калия в наибольшей степени коррелирует со значениями минимума на изображениях, полученных с использованием тепловизора ($K_{\text{кор}}$ -0.65). Значения минимума показывают отражение в среднем ИК диапазоне затененной поверхности почв. Температурные различия затененной поверхности почв, скорее всего, связаны с пространственными неоднород-

ностями влажности, физических свойств почв и содержанием органики. По-видимому, изменение этих свойств приводит к микроварьированию процессов выщелачивания калия в поверхностных горизонтах менее влажных и богатых органикой почв, что и выражается в негативной корреляции с отражением.

Корреляция остальных параметров плодородия почв с показателями отражательной способности низкая.

Необходимо отметить, что выявленные закономерности для отражения в видимой области спектра в целом хорошо согласуются с полученными ранее результатами других исследователей ([Stenberg et al., 2010](#); [Vasat et al., 2014](#); [Camargo et al., 2015](#); [Hong et al., 2018](#)).

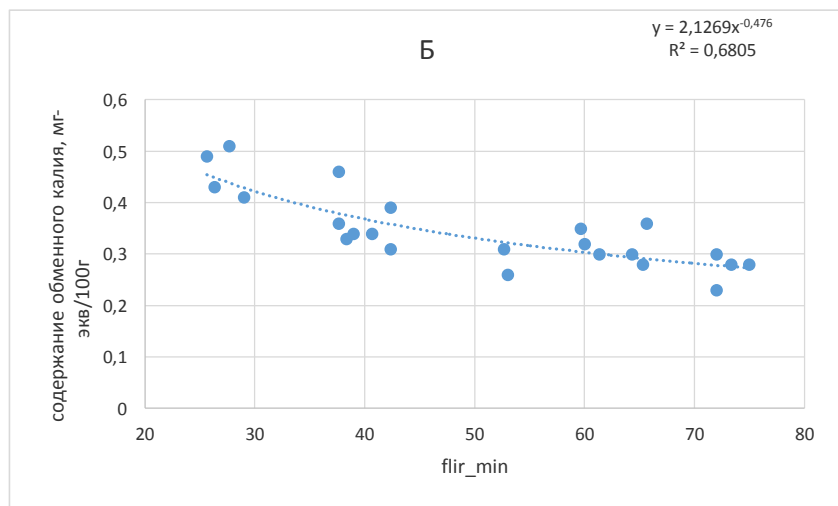
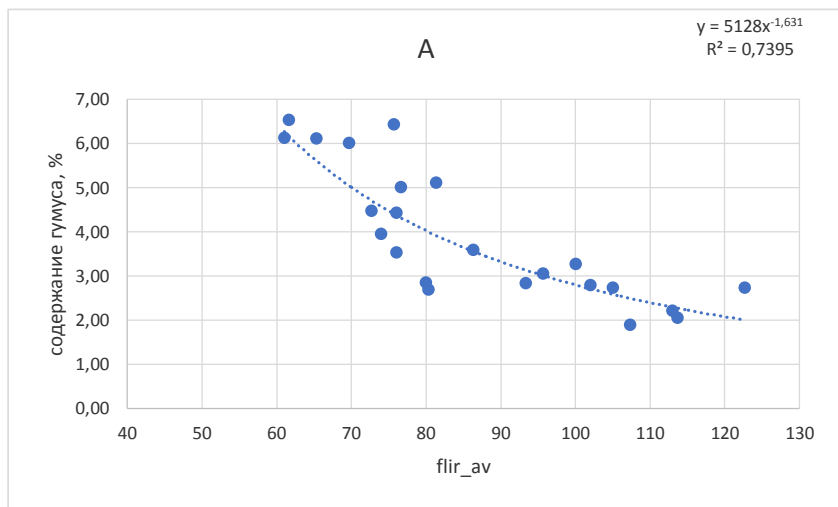
Регрессионный анализ (табл. 4) показал, что наиболее достоверными являются степенные регрессии, что согласуется с теоретическими представлениями о возможной связи параметров плодородия с отражательными свойствами поверхности почв, которые были установлены ранее другими исследователями ([Карманов, 1974](#); [Михайлова, Орлов, 1986](#); [Nanni, Dematte, 2006](#); [Rossel et al., 2010](#)).

На рисунке 3 представлены достоверные степенные зависимости с наиболее высокими нормированными коэффициентами детерминации между отдельными параметрами плодородия почв и данными тепловой съемки.

Из рисунка 3 и таблицы 4 следует, что на основе данных тепловой съемки на тестовом поле могут быть достаточно надежно детектированы такие свойства как содержание гумуса, содержание обменного калия и обменного магния. При этом если в качестве предиктора использовать отражение света в видимой и ближней ИК зонах спектра, то качество регрессии для гумуса и калия будет таким же, как и в случае использования тепловизора, а в случае содержания обменного магния – хуже, чем по данным съемки в MIR диапазоне (табл. 5).

Следовательно, использование тепловизора позволяет получать одинаковые по качеству зависимости для детектирования содержания гумуса и обменного калия в пахотном горизонте почв по сравнению с использованием съемки в видимом и ближнем ИК диапазонах. Но качество регрессии для детектирования содержа-

ния обменного магния оказалось несколько выше.



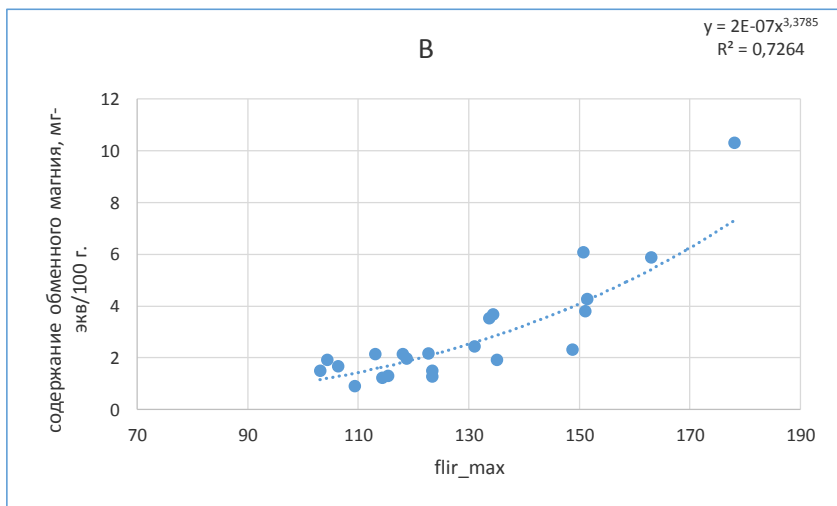


Рис. 3. Регрессионные зависимости между показателями отражения электромагнитных волн в MIR диапазоне с содержанием в почвах гумуса (А), обменного калия (Б) и обменного магния (В).

Fig. 3. Regression relationships between electromagnetic wave reflections in the MIR diapason with soil contents of humus (А), exchangeable potassium (Б) and exchangeable magnesium (В).

Это означает, что использование съемки в среднем ИК диапазоне для картографирования и мониторинга основных параметров плодородия почв региона исследований может быть более перспективным, чем использование для этих же целей многоканальной или гиперспектральной съемки в видимой и ближней ИК области спектра электромагнитных волн. Дополнительным преимуществом тепловой съемки также без сомнения является то, что, по литературным данным, она позволяет более надежно получать информацию и о влажности почв ([Leng et al., 2015](#); [Wang et al., 2018](#)).

Таблица 4. Степенные зависимости с наиболее высокими нормированными коэффициентами детерминации между отдельными параметрами плодородия почв и данными тепловой съемки

Table 4. Power relationships with the highest normalized coefficients of determination between soil fertility parameters and thermal imaging data

Уравнение	Число степеней свободы	Критерий Фишера, уровень значимости 0.05		Средняя ошибка аппроксимации по результатам кросс-валидации, %
		F фактическое	F табличное	
$K^+ = 2.1269 * flir_min^{-0.476}$	21	43.2	4.32	8.5
$Mg^{2+} = 2E-07 * flir_max^{3.3785}$	22	30.1	4.30	20.4
$Humus = 5128 * flir_av^{-1.631}$	21	58.4	4.32	13.6

Таблица 5. Степенные зависимости с наиболее высокими нормированными коэффициентами детерминации между отдельными параметрами плодородия почв и данными отражения света в видимой и ближней ИК области спектра

Table 5. Power relationships with the highest normalized coefficients of determination between selected soil fertility parameters and light reflection data in the visible and near-IR spectrum

Параметр плодородия	Отражение света в диапазоне длин волн (нм)	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
содержание гумуса	400_500	$y = 0.1046x^{-0.525}$	0.52
	500_600	$y = 0.1598x^{-0.697}$	0.62
	600_700	$y = 0.2191x^{-0.781}$	0.67
	700_800	$y = 0.2793x^{-0.807}$	0.72
	800_900	$y = 0.3384x^{-0.787}$	0.73
	400_900	$y = 0.2293x^{-0.701}$	0.66
содержание обменного калия	400_500	$y = 0.0254x^{-0.709}$	0.35
	500_600	$y = 0.0273x^{-0.834}$	0.33
	600_700	$y = 0.0313x^{-0.899}$	0.33
	700_800	$y = 0.038x^{-0.916}$	0.34
	800_900	$y = 0.0473x^{-0.914}$	0.37
	400_900	$y = 0.0377x^{-0.865}$	0.37
содержание обменного магния	400_500	$y = 0.0419x^{0.3264}$	0.53
	500_600	$y = 0.0489x^{0.3954}$	0.54
	600_700	$y = 0.0594x^{0.417}$	0.53
	700_800	$y = 0.0745x^{0.4019}$	0.51
	800_900	$y = 0.0956x^{0.3668}$	0.48
	400_900	$y = 0.0714x^{0.3729}$	0.53

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что:

1. для территории исследований содержание гумуса в пахотном горизонте почв, содержание обменных форм калия и магния и хорошо коррелирующее с ними содержание доступных форм азота и калия может быть успешно определено на основе данных об отражательной способности почв как в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн, так и в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах;

2. использование данных тепловой съемки (средний ИК диапазон) позволяет получать более надежные зависимости для определения содержания обменного магния, что, с учетом возможности более надежного детектирования влажности пахотного горизонта почв по этим данным, позволяет считать данные тепловой съемки более перспективными для детектирования основных параметров плодородия почв региона;

3. полученные регрессионные зависимости могут быть использованы в качестве основы для оперативного дистанционного мониторинга основных параметров плодородия почв тестового поля;

4. выявленные зависимости без сомнения региональны и могут иметь другой вид для полей с иным строением почвенного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматический справочник по Тульской области. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 128 с.
2. Анциферов А.Ю. Технологические особенности идентификации состояния почв методами дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. С. 76–80.
3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986 г. 416 с.
4. Карманов И.И. Спектральная отражательная способность и цвет почв как показатели их свойств. М.: Колос, 1974. 351 с.
5. Качинский Н.А. Физика почвы. Часть 1. М.: Высшая школа, 1965. 321 с.

6. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.
7. Михайлова Н.А., Орлов Д.С. Оптические свойства почв и почвенных компонентов. М.: Наука, 1986. 119 с.
8. Обухов А.И., Орлов Д.С. Спектральная отражательная способность главнейших типов почв и возможности использования диффузного отражения при почвенных исследованиях // Почвоведение. 1964. № 2. С. 83–93.
9. Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: МГУ, 2001. 176 с.
10. Ратников А.И. Почвы Тульской области: Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М., 1960. 25 с.
11. Редькин Ф.Б., Геннадиев А.Н., Савин И.Ю. Антропогенно измененные почвы севера Среднерусской возвышенности: эволюция и классификация // Ветн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1996. № 2. С. 31–36.
12. Савин И.Ю. Современный спутниковый мониторинг почв и посевов: достижения и проблемы // В сборнике: Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве. 2015. С. 29–32.
13. Савин И.Ю., Симакова М.С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.
14. Симакова М.С., Савин И.Ю. Использование материалов аэро-и космической съемки в картографировании почв: пути развития, состояние, задачи // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1339–1347.
15. Сорокина Н.П. Структура почвенного покрова пахотных земель: Типизация, картографирование, агроэкологическая оценка: Дисс. ... докт. с.-х. наук: 03.00.27. М., 2003. 294 с.
16. Чинилин А.В., Савин И.Ю. Потенциальные возможности дистанционной индикации характера почвообразующих и подстилающих пород черноземных почв по цветовым характеристикам их поверхности // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. № 1. С. 48–59.
17. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: МГУ, 2005. 432 с.
18. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия. М.: Колос, 2002. 584 с.

19. *Camargo L.A., Marques J., Barron V., Ferracciu Alleoni L.R., Barbosa R.S., Pereira G.T.* Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy // *Geoderma*. 2015. Vol. 251. P. 124–132.
20. *Coutinho M.A.N., Alari F. de O., Ferreira M.M.C.* Influence of soil sample preparation on the quantification of NPK content via spectroscopy // *Geoderma*. 2019. Vol. 338. P. 401–409.
21. *Csillag F., Pasztor L., Biehl L.L.* Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils // *Remote Sensing of Environment*. 1993. Vol. 43 (4). P. 231–242.
22. *Dhawale N.M., Adamchuk V.I., Prasher S.O., Rossel R.A.V., Ismail A.A., Kaur J.* Proximal soil sensing of soil texture and organic matter with a prototype portable mid-infrared spectrometer // *European journal of soil science*. 2016. Vol. 66. P. 661–669.
23. *Hong Y., Yu L., Chen Y., Liu Y., Cheng H.* Prediction of Soil Organic Matter by VIS-NIR Spectroscopy Using Normalized Soil Moisture Index as a Proxy of Soil Moisture // *Remote sensing*. 2018. Vol. 10. 28 p.
24. *Islam K., Singh B., McBratney A.* Simultaneous Estimation of Several Soil Properties by Ultra-Violet, Visible, and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy // *Australian Journal of Soil Research*. 2003. Vol. 41. P. 1101–1114.
25. *Lenq P., Song X., Li Z.L., Wang Y., Wang D.* Effects of vegetation and soil texture on surface soil moisture retrieval using multi-temporal optical and thermal infrared observations // *International journal of remote sensing*. 2015. Vol. 36. P. 4972–4985.
26. *Ma F., Du C., Zhou J.* A Self-Adaptive Model for the Prediction of Soil Organic Matter Using Mid-Infrared Photoacoustic Spectroscopy // *Soil science society of America journal*. 2016. Vol. 80. P. 238–246.
27. *Nanni M.R., Dematte J.A.M.* Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis // *Soil science society of America journal*. 2006. Vol. 70. P. 393–407.
28. *Palombo A., Pascucci S., Loperte A.* Soil Moisture Retrieval by Integrating TASI-600 Airborne Thermal Data // *Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 1515.
29. *Rossel R.A.V., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O.* Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties // *Geoderma*. 2006. Vol. 131. P. 59–75.
30. *Rossel R.A.V., Rizzo R., Dematte J.A.M., Behrens T.* Spatial Modeling of a Soil Fertility Index using Visible-Near-Infrared Spectra and Terrain Attributes // *Soil science society of America journal*. 2010. Vol. 74. P. 1293–1300.

31. Sanchez J.M., French A.N., Mira M., Hunsaker D.J., Thorp K. R., Valor E., Caselles V. Thermal Infrared Emissivity Dependence on Soil Moisture in Field Conditions // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2011. Vol. 49. P. 4652–4659.
32. Soriano-Disla J.M., Janik L.J., Rossel R.A.V., Macdonald, L. M. McLaughlin M.J. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties // Applied spectroscopy reviews. 2014. Vol. 49. P. 139–186.
33. Stenberg B., Rossel R.A.V., Mouazen A. M., Wetterlind J. Visible and near infrared spectroscopy in soil science // Advances in agronomy. 2010. Vol. 107. P. 163–215.
34. Vasat R., Kodesova R., Boruvka L., Klement A., Jaksik O., Gholizadeh A. Consideration of peak parameters derived from continuum-removed spectra to predict extractable nutrients in soils with visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-DRS) // Geoderma. 2014. Vol. 232–234. P. 208–218.
35. Wang Y., Peng J., Song X., Leng P., Ludwig R., Loew A. Surface Soil Moisture Retrieval Using Optical/Thermal Infrared Remote Sensing Data // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2018. Vol. 56. No. 9. P. 5433–5442.
36. Xia Y., Ugarte C.M., Guan K., Pentrak M. Developing Near- and Mid-Infrared Spectroscopy Analysis Methods for Rapid Assessment of Soil Quality in Illinois // Soil science society of America journal. 2018. Vol. 82. No. 6. P. 1415–1427.

REFERENCES

1. *Agroklimaticheskii spravochnik po Tulskoi oblasti* (Agroclimatic guide to the Tula region), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1958, 128 p.
2. Antsiferov A.Yu., *Tekhnologicheskie osobennosti identifikatsii sostoyaniya pochv metodami dstantsionnogo zondirovaniya* (Technological features of identification of soil condition by remote sensing methods), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Geodeziya i aerofotosemka*, 2012, pp. 76–80.
3. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
4. Karmanov I.I., *Spektralnaya otrazhatelnaya sposobnost i tsvet pochv kak pokazateli ikh svoystv* (Spectral reflectivity and color of soils as indicators of their properties), Moscow: Kolos, 1974, 351 p.

5. Kachinskii N.A., *Fizika pochvy* (Soil physics), Moscow: Vysshaya shkola, 1965, 321 p.
6. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel selskokhozyaistvennogo naznacheniya* (Guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands), Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2003, 240 p.
7. Mikhailova N.A., Orlov D.S., *Opticheskie svoystva pochv i pochvennykh komponentov* (Optical properties of soils and soil components), Moscow: Nauka, 1986, 119 p.
8. Obukhov A.I., Orlov D.S., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost glavneishikh tipov pochv i vozmozhnosti ispolzovaniya diffuznogo otrazheniya pri pochvennykh issledovaniyakh* (Spectral reflectivity of the most important soil types and the possibility of using diffuse reflection in soil studies), *Pochvovedenie*, Moscow, 1964, No. 2, pp. 83–93.
9. Orlov D.S., Sukhanova N.I., Rozanova M.S., *Spektral'naya otrazhatelnaya sposobnost pochv i ikh komponentov* (Spectral reflectivity of soils and their components), Moscow: MGU, 2001, 176 p.
10. Ratnikov A.I., *Pochvy Tul'skoi oblasti: Avtoref. diss. ... kand. s.-kh. nauk* (Soils of the Tula region: Extended Abstract of Cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1960, 25 p.
11. Red'kin F.B., Gennadiev A.N., Savin I.Yu., *Antropogенно измененные почвы севера Среднерусской возвышенности: эволюция и классификация* (Anthropogenically modified soils of the north of the Central Russian Upland: evolution and classification), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, Moscow, 1996, No. 2, pp. 31–36.
12. Savin I.Yu., *Sovremennyyi sputnikovy monitoring pochv i posevov: dostizheniya i problemy* (Modern satellite monitoring of soils and crops: achievements and challenges), In: *Primenenie sredstv dstantsionnogo zondirovaniya zemli v selskom khozyaistve* (Application of remote sensing tools in agriculture), 2015, pp. 29–32.
13. Savin I.Yu., Simakova M.S., *Sputnikovye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii* (Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia), *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 104–115.
14. Simakova M.S., Savin I.Yu., *Ispolzovanie materialov aero-i kosmicheskoi semki v kartografirovanii pochv: puti razvitiya, sostoyanie, zadachi* (The use of aerial and satellite imagery in soil mapping: development paths, status, tasks), *Pochvovedenie*, 1998, No. 11, pp. 1339–1347.
15. Sorokina N.P., *Struktura pochvennogo pokrova pakhotnykh zemel: Tipizatsiya, kartografirovanie, agroekologicheskaya otsenka: Diss. ... dokt. s.-kh. nauk: 03.00.27* (The structure of the soil cover of arable land: Typification,

mapping, agroecological assessment: Doctor of agric. sci. thesis), Moscow, 2003, 294 p.

16. Chinilin A.V., Savin I.Yu., Potentsial'nye vozmozhnosti distantsionnoi indikatsii kharaktera pochvoobrazuyushchikh i podstilayushchikh porod chernozemnykh pochv po tsvetovym kharakteristikam ikh poverkhnosti (Potential remote indication of the nature of soil-forming and underlying rocks of chernozem soils by the color characteristics of their surface), *Izvestiya Timiryazevskoi selskokhozyaistvennoi akademii*, 2018, No. 1, pp. 48–59.

17. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil physics course), Moscow: MGU, 2005, 432 p.

18. Yagodin B.A., Zhukov Yu.P., Kobzarenko V.I., *Agrokimiya* (Agrochemistry), Moscow: Kolos, 2002, 584 p.

19. Camargo L.A., Marques J., Barron V., Ferracciu Alleoni L.R., Barbosa R.S., Pereira G.T., Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy, *Geoderma*, 2015, Vol. 251, pp. 124–132.

20. Coutinho M.A.N., Alari F. de O., Ferreira M.M.C., Influence of soil sample preparation on the quantification of NPK content via spectroscopy, *Geoderma*, 2019, Vol. 338, pp. 401–409.

21. Csillag F., Pasztor L., Biehl L.L., Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils, *Remote Sensing of Environment*, 1993, Vol. 43 (4), pp. 231–242.

22. Dhawale N.M., Adamchuk V.I., Prasher S.O., Rossel R.A.V., Ismail A.A., Kaur J., Proximal soil sensing of soil texture and organic matter with a prototype portable mid-infrared spectrometer, *European journal of soil science*, 2016, Vol. 66, pp. 661–669.

23. Hong Y., Yu L., Chen Y., Liu Y., Cheng H., Prediction of Soil Organic Matter by VIS-NIR Spectroscopy Using Normalized Soil Moisture Index as a Proxy of Soil Moisture, *Remote sensing*, 2018, Vol. 10, p. 28.

24. Islam K., Singh B., McBratney A., Simultaneous Estimation of Several Soil Properties by Ultra-Violet, Visible, and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy, *Australian Journal of Soil Research*, 2003, Vol. 41, pp. 1101–1114.

25. Leng P., Song X., Li Z.L., Wang Y., Wang D., Effects of vegetation and soil texture on surface soil moisture retrieval using multi-temporal optical and thermal infrared observations, *International journal of remote sensing*, 2015, Vol. 36, pp. 4972–4985.

26. Ma F., Du C., Zhou J., A Self-Adaptive Model for the Prediction of Soil Organic Matter Using Mid-Infrared Photoacoustic Spectroscopy, *Soil science society of America journal*, 2016, Vol. 80, pp. 238–246.

27. Nanni M.R., Dematte J.A.M., Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis, *Soil science society of America journal*, 2006, Vol. 70, pp. 393–407.
28. Palombo A., Pascucci S., Loperte A., Soil Moisture Retrieval by Integrating TASI-600 Airborne Thermal Data, *Sensors*, 2019, Vol. 19, p. 1515.
29. Rossel R.A.V., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O., Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, pp. 59–75.
30. Rossel R.A.V., Rizzo R., Dematte J.A.M., Behrens T., Spatial Modeling of a Soil Fertility Index using Visible-Near-Infrared Spectra and Terrain Attributes, *Soil science society of America journal*, 2010, Vol. 74, pp. 1293–1300.
31. Sanchez J.M., French A.N., Mira M., Hunsaker D.J., Thorp K.R., Valor E., Caselles V., Thermal Infrared Emissivity Dependence on Soil Moisture in Field Conditions, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2011, Vol. 49, pp. 4652–4659.
32. Soriano-Disla J.M., Janik L.J., Rossel R.A.V., Macdonald, L.M. McLaughlin M.J., The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties, *Applied spectroscopy reviews*, 2014, Vol. 49, pp. 139–186.
33. Stenberg B., Rossel R.A.V., Mouazen A.M., Wetterlind J., Visible and near infrared spectroscopy in soil science, *Advances in agronomy*, 2010, Vol. 107, pp. 163–215.
34. Vasat R., Kodesova R., Boruvka L., Klement A., Jaksik O., Gholizadeh A., Consideration of peak parameters derived from continuum-removed spectra to predict extractable nutrients in soils with visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-DRS), *Geoderma*, 2014, Vol. 232–234, pp. 208–218.
35. Wang Y., Peng J., Song X., Leng P., Ludwig R., Loew A., Surface Soil Moisture Retrieval Using Optical/Thermal Infrared Remote Sensing Data, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2018, Vol. 56, No. 9, pp. 5433–5442.
36. Xia Y., Ugarte C.M., Guan K., Pentrak M., Developing Near- and Mid-Infrared Spectroscopy Analysis Methods for Rapid Assessment of Soil Quality in Illinois, *Soil science society of America journal*, 2018, Vol. 82, No. 6, pp. 1415–1427.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-173-207



Ссылки для цитирования:

Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Каганова А.Е. Расчетная реконструкция профильного распределения минералов по содержанию стабильного компонента на примере солонца коркового светлого сухостепной зоны юга России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 173-207. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-173-207

Cite this article as:

Varlamov E.B., Churilin N.A., Kaganova A.E., Predicted reconstruction of the profile distribution of minerals according to the content of the stable component in the crust light solonetz of dry-steppe zone in the south of Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 173-207, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-173-207

Благодарность:

Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ 18-016-00129А.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of the scientific project No. 18-016-00129A.

Расчетная реконструкция профильного распределения минералов по содержанию стабильного компонента на примере солонца коркового светлого сухостепной зоны юга России

© 2020 г. Е. Б. Варламов*, Н. А. Чурилин, А. Е. Каганова

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

*<https://orcid.org/0000-0003-4295-725X>, e-mail: evgheni968@rambler.ru.

Поступила в редакцию 07.02.2020, после доработки 02.08.2020,
принята к публикации 17.12.2020

Резюме: На основе детального, сопряженного, качественного и количественного анализа глинистых и кластогенных минералов коркового солонца Заволжья рассчитан профильный состав минералов по содержанию стабильного компонента. При этом принята изначальная минералогическая однородность почвенного профиля, определенная

методом стабильного компонента – содержания в профиле калиевого полевого шпата. Показатели плотности почвы к расчетам не привлекали. Профильные расчеты минералов проведены на уровне потерь и прибавок их процентного содержания в генетических горизонтах по отношению к породе, выраженных в кг/100 кг породы. Расчетные значения для глинистых минералов отрицательные в надсолонцовом и положительные в солонцовых горизонтах. Для кластогенных минералов отрицательные расчетные значения установлены в надсолонцовом горизонте, с максимумом убыли в солонцовых горизонтах, и положительные – в аккумулятивно-карбонатных горизонтах. Расчетными значениями минералов и масс силикатной части для почвы установлена глубокая проработанность профиля, которая выявлена по отрицательным значениям массы кластогенных минералов и избыточной массе глинистых минералов в иллювиальной части профиля по отношению к калиевым полевым шпатам. Накопление иллита в поверхностных горизонтах объясняется как процессом иллитизации, так и значительным физическим дроблением слюдистых минералов крупных фракций до размера илтистых частиц. Проведенные расчеты профильного распределения кластогенных и глинистых минералов позволили иным способом проанализировать элювиально-иллювиальную дифференциацию минеральной части почвы. Однако наличие литологической неоднородности профиля с определенным искажением влияет и на объемы изменений в минералогии почвы.

Ключевые слова: кластогенные минералы, глинистые минералы, калиевый полевой шпат, кварц, смешанослойные образования, иллит, хлорит, каолинит.

Predicted reconstruction of the profile distribution of minerals according to the content of the stable component in the crust light solonetz of dry-steppe zone in the south of Russia

E. B. Varlamov^{*}, N. A. Churilin, A. E. Kaganova

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

^{}<https://orcid.org/0000-0003-4295-725X>, e-mail: evgheni968@rambler.ru.*

Received 07.02.2020, Revised 02.08.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: On the basis of detailed, conjugated, qualitative and quantitative analysis of clay and clastogenic minerals of the crust solonetz of the Volga region, the profile composition of minerals is calculated according to the content of a stable component. At the same time, the initial mineralogical homogeneity of the soil profile, determined by the method of a stable component – the content of K-feldspar in the profile, was adapted. Soil density indicators were not involved in the calculations. Profile calculations of minerals were carried out at the level of losses and increases of their percentage in genetic horizons relative to the rock, expressed in kg/100 kg of rock. Design values for clay minerals – negative in suprasolonetz and positive – in solonetz horizons. For clastogenic minerals, negative design values are set in suprasolonetz, with a maximum decrease in solonetz gori-umbrellas, and positive in accumulative-carbonate horizons. The calculated values of minerals and masses of the silicate part allowed establishing the deep development of the soil profile, which was revealed by negative values of the mass of clastogenic minerals and an excess mass of clay minerals in the illuvial part of the profile with respect to potassium feldspar. The accumulation of illite in the surface horizons is explained both by the illitization process and by the significant physical crushing of mica minerals of large fractions to the size of silty particles. The lithological heterogeneity of the profile affects the distortion of the calculation results. Calculated model of substances is formed in solonetz profile by real distribution of mineralogical components of eluvial-illuviation process.

Keywords: clusters minerals, clay minerals, K-feldspar, quartz, mixed layer minerals, illite, chlorite, kaolinite.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение особенностей профильного распределения минералов представляет большой интерес ввиду того, что при некотором допущении оно (распределение) является свидетелем направленности эволюции почв. Сравнение горизонтов почвы и почвообразующей породы позволяет выделить те компоненты, которые предположительно разрушаются при почвообразовании и выветривании, однако оно не может ничего дать для оценки количества разрушенного материала. Для достижения этой цели служат балансовые расчеты. При всех балансовых расчетах предполагается исходная однородность почвообразующей породы. Существует несколько методов балансовых расчетов ([Розанов, 1975](#)), среди которых наиболее широкое распространение имеют следующие:

метод стабильного компонента и изообъемный метод. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. При изообъемном методе дополнительно предполагается, что уровень дневной поверхности не менялся в ходе почвообразования. Такое допущение оправдано, если в почвах сохраняется текстура исходной породы (как в корах выветривания в тропиках), однако к почвам, имеющим текстурно-дифференцированный профиль, это применить невозможно. В методе стабильного компонента дополнительно предполагается, что в почве имеется компонент, который не разрушается, не образуется при почвообразовании и не привносится со стороны. Изложению сущности этого метода посвящены многочисленные работы ([Smeck et al., 1980](#); [Седлецкий, 1938](#); [Розанов, 1975](#); [Симонов, 2000](#)). Прекрасные образцы применения метода оставил нам А.А. Роде ([Роде, 2008](#)). Он же рассмотрел идеологию сравнительно-аналитического метода, многие принципы которой перенесены в структуру балансового метода и толкования его результатов.

Среди большого количества работ по минералогическому составу и его профильному распределению в почвах ([Чижикова и др., 1973, 2017](#); [Соколова и др., 2005](#); [Варламов и др., 2018](#) и др.) вопросам баланса внимание практически не уделяется. Основная проблема в этой связи, помимо фиксирования профильного распределения минералов, – это выделение наиболее устойчивой к выветриванию части, которая будет выступать в качестве “свидетеля”. Метод выделения наиболее устойчивого (стабильного) компонента минеральной массы почв был впервые применен П.С. Коссовичем в 1916 г. ([Коссович, 1916](#)). В качестве критерия устойчивости компонентов в профиле почв он использовал отношение содержания окисла в верхнем, наиболее выветрелом горизонте к его содержанию в почвообразующей породе. Компонент, показывающий максимум такого отношения, обладает наибольшей устойчивостью и принимается за “свидетеля” во всем почвенном профиле. В некоторых работах ([Алексеев, 1999, 2012](#)) при расчете баланса широко используется ряд критериев для выявления особенностей генезиса и минералогии почв: отношения процента кварца к проценту слоистых алюмосиликатов; кварца к содержанию илистой фракции; кварца к полевому шпату в опреде-

ляемом горизонте к таковому отношению в почвообразующей породе и ряд других показателей. На почвах Русской равнины ([Халчева, 1974](#)) было применено отношение минералов или групп минералов, обладающих различной устойчивостью. Наряду с некоторыми другими коэффициентами было предложено использовать так называемый “простой роговообманковый коэффициент” – отношение циркона и турмалина к роговой обманке и “частный роговообманково-эпидотовый коэффициент”, представляющий собой отношение титансодержащих минералов, циркона, турмалина и граната к сумме роговых обманок и эпидота. Последний аргумент не всегда позволяет привлекать в качестве “свидетеля” такие устойчивые минералы как циркон, гранат и другие, содержание которых в почве мало, определение их трудоемко, а точность определения недостаточно велика. Построенные многими авторами ряды выветривания минералов относятся к условиям гипергенеза вообще, или к определенному типу почв: подзолистым, лесным ([Макеев и др., 1989](#)) и черноземным почвам. Известно, что устойчивость минералов зависит как от условий выветривания, так и от строения их кристаллической решетки. Изменение минералогического состава в почвенных монолитах детально рассмотрено ([Прудникова и др., 2019](#)) в ходе модельного эксперимента на пахотных горизонтах разных типов почв, где расчетный баланс проведен по отношению к содержанию кварца на исходных гомогенизированных почвенных субстратах. В большинстве указанных работ в качестве наиболее устойчивого в почвах минерала рассматривался кварц. Таким образом, из кластогенных минералов наиболее устойчивые минералы приходится искать среди небольшой группы, включающей в себя кварц, калиевые полевые шпаты, плагиоклазы, слюды. В профилях каштановых почв, особенно в солонцах, проявляется дифференциация по гранулометрическому составу илистой фракции, которая сопровождается и дифференциацией по минералогическому составу с накоплением в элювиальных горизонтах иллитов и потерей смешанослойных минералов ([Травникова и др., 1967, 1968, 1976, 1977; Соколова, 2013](#)). Наличие в профиле почвы легкорастворимых солей (в средней и нижней частях профиля текстурной дифференциации по содержанию ила) не позволяет нам обоснованно

использовать в качестве “свидетелей” глинистые минералы. В условиях щелочной реакции процесс растворения глинистых минералов интенсифицируется ([Kamil et al., 1968](#); [Bar-On et al., 1970](#); [Соколова, 2013](#)). В отдельных работах ([Симонов и др., 1981, 1982](#); [Симонов, 2000](#)) при обобщении фактического материала по пространственной зональности абсолютно устойчивых минералов сделан вывод, из которого следует, что кварц является наиболее устойчивым минералом не во всех почвенных типах и что минералы, которые отнесены к устойчивым, закономерно изменяются в зональном ряду почв. Из этого следует, что в почвах, имеющих щелочную реакцию, наиболее устойчивым минералом оказывается не кварц, а калиевые полевые шпаты. В работе Р. Egli ([Egli et al., 2000](#)) косвенно используется минералогия в перерасчете на минералогическую основу и рассматривается расчет химических элементов из кислотных вытяжек, в которых расчеты выполнены по отношению к породе, а выводы основаны на разности убыли и прибавки элемента по профилям аллювиальных почв. Среди зарубежных публикаций отмечается ряд работ, посвященных устойчивости отдельных минералов как в лабораторных экспериментах, так и в условиях гипергенеза. Трехстадийный механизм выветривания альбита детально рассмотрен у R. Wollast и L. Chou ([Wollast, Chou, 1985](#)). Авторами установлено, что на начальной стадии выщелачивание альбита компенсируется в гидратированном слое ионами водорода, в результате образуется водородный слой; а потеря натрия компенсируется дополнительными алюмосиликатными слоями с последующим медленным диффузным растворением вглубь частицы альбита, на скорость его растворения значительно влияет концентрация солей, особенно при повышении pH раствора.

Работы, затрагивающие вопросы балансовых расчетов минералов почв указанного региона, нам не известны. Таким образом, представленный обзор проблемы выделения наиболее устойчивых (стабильных) минералов весьма сложен, при этом решение этих задач имеет большое значение в теоретическом почвоведении. Для объекта нашего исследования выбор устойчивого минерала осложнен еще и специфичностью солонцового процесса. Поскольку все расчеты содержания отдельных компонентов почвы

требуют привлечения данных о профильном распределении и количественном содержании наиболее устойчивого минерала, который рассматривается в качестве “свидетеля”, то необходим обязательный количественный сопряженный минералогический анализ кластогенных и глинистых минералов. В данной работе расчет минералов выполнен по содержанию стабильного компонента в профиле.

В связи с отсутствием данных по плотности сложения и изменению ее значений в профиле наши расчеты можно считать минералогическим относительным “балансом” для почвы, эти расчеты проведены при допущении и признании исходной литологической однородности на условиях, перечисленных ниже.

За почвообразующую породу для всех горизонтов почвенного профиля принимается слой породы, расположенный под почвенным профилем. Различия в вещественном составе почвенных горизонтов по отношению к принятой почвообразующей породе считаются результатом почвообразования. Для изучаемой почвы мы имеем возможность пренебречь денудацией и аккумуляцией вещества ([Сток наносов..., 1977](#)). Указанное допущение при возможном наличии дополнительного синлитогенного привноса минералогического материала в почвы добавляет неточности, следовательно, наши расчеты воспроизводят только некоторые частные случаи естественного генезиса солонцов, и в основном это касается средней и нижней частей профиля. В работе мы основывались на представлениях о том, что в процессе генезиса данных солонцов происходит выветривание минеральной части и вынос продуктов разрушения в нижележащие горизонты и (или) за пределы профиля. Разрушению подвергаются не все типы минералов, а только способные к выветриванию в данных геохимических условиях, по фактору времени при всех однотипных условиях более устойчивые минералы относительно накапливаются и служат минералогическими “реперами”. Разделение полиминеральной фазы почв на устойчивую (в конкретных условиях) и неустойчивую к выветриванию весьма условно, так как практически все минералы в той или иной степени подвергаются выветриванию ([Градусов, 1967, 1974, 1976](#)). Несмотря на указанные недостатки такого подхода к вычислениям, считаем необходимым проводить такие рас-

четные сравнения, хотя на самом деле очевидно, что из-за сложности комплестного минералогического сопряженного анализа кластогенных и глинистых минералов изложенный подход редко применяется. Тем не менее, используя данные подобных расчетов, возможен учет плодородия почв, а именно потенциальных запасов доступных растениям элементов питания из минералов почвенного профиля. Предложенный подход можно применять и к почвам, сформировавшимся на территориях, имеющих разный относительный возраст отложений, при условии однотипности минералогии почвообразующих пород. Очевидно, применение этого способа расчета позволит установить качественные и количественные изменения минералогического состава во времени.

Цель работы – рассчитать профильный состав минералов по содержанию стабильного компонента калиевого полевого шпата (КПШ) на основе данных сопряженного минералогического анализа кластогенных и глинистых минералов в профиле солонца.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования послужил солонец светлый корковый (разр. ЗК-2) около населенного пункта Борси с координатами: 50.108° с. ш. 47.156° в. д. Разрез заложен под сильно разреженной растительностью (проективное покрытие около 20%), которая представлена преобладающими видами *Kochia prostrata* (L.) Schrad (*Bassia prostrata* (L.) A.J. Scott в сопровождении прутняка простертого, семейство Chenopodiaceae, – многолетний ксерогалофит (засухо- и солеустойчивое растение)), на раннехвалынских отложениях на территории с абсолютной высотой 48 м над ур. м., возраст которой составляет около 17 тыс. лет ([Арсланов и др., 2013](#); [Чепалыга, Пирогов, 2006](#)). По Полевому определителю почв России (2008) почва относится к солонцу светлому корковому карбонатному солончаковатому, по WRB-2015 (IUSS Working Group WRB, 2015) – Calcic Gypsic Endosalic Solonetz (Columnic Cutanic Differentic).

В исследовании использованы данные профильного распределения глинистых и кластогенных минералов в профиле солонца ([Варламов и др., 2018](#)). Количественные расчеты минералов в указанной работе были выполнены по методическим рекомендациям

([Biscaye, 1965](#); [Cook et al., 1975](#)). К глинистым минералам отнесены тонкодисперсные слоистые силикаты с размером частиц <1 мкм. Это значит, что кварц и полевые шпаты с таким же размером частиц не входят в число глинистых минералов. К кластогенными мы относим минералы с каркасной и слоистой структурой и размером частиц >1 мкм. Во фракции >1 мкм оказался и глинистый минерал каолинит, его количественная оценка велась в этой же фракции наряду с кластогенными. Анализ продолжен рассмотрением распределения указанных групп минералов по профилю и оценкой результатов балансовых расчетов минералов. Нами в расчетах использовались данные количественного анализа кластогенных и глинистых минералов в весовых процентах, приравненные к кг/100 кг силикатного материала горизонтов к условной породе. Показатели плотности почвы к расчетам не привлекали на том основании, что, по-видимому, невозможно доказать их постоянство на всем протяжении развития почвы. Заметные изменения плотности почвенного профиля будут связаны с присутствием гумуса, растительного детрита и фитолитами, а также с содержанием в профиле значительного количества солей. Используемые в работе данные профильного минералогического состава получены на бесгумусную, бессолевую навеску почвы. При необходимости данные плотности почвы могут быть введены в расчеты. Потерю, прибавку минерала ([Алексеев, 1999](#)) устанавливали по формуле:

$$Мд = Мгп - Мп, \quad (1)$$

Мд – убыль или прибавка минерала в горизонте в сравнении с породой, кг/100 кг породы;

Мгп – содержание минерала в горизонте, приведенное к содержанию калиевого полевого шпата в породе, кг/100 кг породы;

Мп – содержание минерала в породе, кг/100 кг.

Мгп рассчитывается по формуле:

$$Мгп = \frac{КПШп \times Мг}{КПШг}, \quad (2)$$

КПШп – содержание калиевого полевого шпата в породе, кг/100 кг;

КПШг – содержание калиевого полевого шпата в горизонте, вес. % или кг/100 кг;

Мг – содержание минерала в горизонте, вес. % или кг/100 кг.

Так как в процессе выветривания происходит накапливание наиболее устойчивого компонента, то по формуле (2) мы устанавливаем, сколько содержалось бы минерала в горизонте, если привести его к содержанию калиевого полевого шпата (КПШ) в породе в пропорциональном соотношении с содержанием КПШ и с фактическим содержанием его (КПШ) в горизонте. В формуле (1) Мгп и Мп переставлены местами для того, чтобы в результате произведенного действия полученный знак указывал на убыль или прибавку минерала.

Использованная нами точка отсчета – гор. Сса,s, глубина 110–130 см – обосновывалась отсутствием явных признаков воздействия процессов почвообразования на минеральную часть почвы. Исходя из этого, используемая в работе точка отсчета весьма условная, но при этом она морфологически привязана к достоверно диагностированным генетическим горизонтам исследованного солонца. Итоговые результаты такого расчета балансовых потерь и прибавок по минералам >1мкм представлены в (табл. 2, 3).

Таблицы 2, 3 состоят из трех частей. В первой части приведены исходные данные по содержанию минералов кластогенных и глинистых в весовых процентах. Во второй – данные по содержанию этих минералов в кг/100 кг породы (численно равные процентам), приведенные к содержанию калиевого полевого шпата в породе. Расчет выполнен по формуле (2). В третьей – данные по разнице содержания в горизонте и породе минералов и их сумм, полученных из второй части. В левой и средней части этой таблицы показано исходное содержание кластогенных минералов в почве и их количество в генетическом горизонте, приведенное к содержанию КПШ в породе расчет по формуле (1). С расчетным содержанием глинистых минералов (фракция <1 мкм) можно ознакомить-

ся по данным таблицы 3. Она построена по тому же принципу, что и для кластогенных минералов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изученный солонец развит на тяжелых отложениях – пылевато-иловатого гранулометрического состава, поскольку преобладает фракция крупной пыли (табл. 1). По содержанию физической глины (определение пирофосфатным методом по Качинскому) все горизонты профиля попадают в категорию легкой глины, за исключением гор. SEL (суглинок средний) и гор. С (тяжелый суглинок). Надсолонцовый гор. SEL обеднен как физической глиной, так и илистой фракцией, в частности, для него характерно наименьшее содержание частиц <1 мкм во всем профиле ($<7\%$). Максимум содержания илистой фракции наблюдается в солонцовом гор. BSN2 (41.1%), вглубь профиля содержание фракции постепенно уменьшается до 28.7% в гор. Cca,s (110–130 см). Содержание суммы фракций >1 мкм с преобладанием частиц крупнопылевой размерности (0.05–0.001 мм) имеют обратное или количественное содержание в профиле почвы. Распределение фракций тонкой пыли (0.001–0.005 мм) максимально с поверхности и минимально в средней части профиля, содержание средней пыли (0.01–0.005 мм) равномерное и практически не изменяется по профилю. В профиле отмечается обедненность солонцовых горизонтов фракцией средней пыли (BSN1, BSN2 и BSN3s), которая обусловлена возрастанием доли илистых частиц в связи с их перераспределением внутри профиля. В изученном профиле солонца отсутствуют данные о содержании гранулометрических фракций в слое от 70 до 110 см. По своим морфологическим и физико-химическим свойствам этот слой аналогичен горизонту BCAnс, поэтому они не приводятся. Совокупный анализ характера распределения ила и других фракций показал, что профильное распределение фракций характерное для солонцов, при этом наиболее значимые изменения механического состава наблюдаются только в первом метровом слое солонца и проявляются, главным образом, в накоплении на различной глубине ила. Таким образом, профильное распределение ила в почве имеет элювиально-иллювиальный характер.

Таблица 1. Содержание гранулометрических фракций в солонце разр. ЗК-2 (по Качинскому)
Table 1. The content of particle size fractions in the solonetz ЗК-2 (according to Kachinsky)

Горизонт	Глубина, см	Содержание фракции, %						
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	<0.001	физ. глина
SEL	0–5	1.25	20.75	47.36	12.44	11.42	6.78	30.64
BSN1	5–16	0.14	12.88	32.22	9.38	12.70	32.68	54.76
BSN2	16–26	0.16	15.10	23.46	9.28	10.92	41.08	61.28
BSN3s	26–35	0.16	16.20	27.16	6.94	12.18	37.36	56.48
BCAs,cs	35–45	0.03	13.21	25.54	17.04	12.72	31.46	61.22
BCAnc	45–70	0.06	13.32	28.84	11.88	13.90	32.00	57.78
Cca,s	180–200	0.38	19.76	34.84	6.72	09.64	28.66	45.02

Меньше всего илистой фракции содержится в надсолонцовом горизонте SEL, мощность которого около 5 см. Наибольшее количество илистой фракций в профиле содержат солонцовые горизонты BSN. Суммарные данные гранулометрического состава отражают четкую дифференциацию профиля по распределению гранулометрических фракций по вертикали, о чем свидетельствует активный вынос ила из гор. SEL и его аккумуляция в гор. BSN (фракция <0.001 мм, 6.78–41.08%). Аналогичный характер распределения наблюдается и для физической глины (фракция <0.01 мм, 30.64–61.28%). Это происходит на фоне интенсивного физического дробления частиц всех размерностей, но особенно пылеватых частиц.

Необходимо отметить тот факт, что прибавка ила в солонцовых горизонтах больше, чем его убыль из надсолонцового горизонта.

Обезыливание верхних горизонтов объясняется не только активно проходящим процессом лессиважа, но и, по-видимому, разрушением глинистых частиц в результате щелочного гидролиза. Обращаем внимание на небольшое отличие величин по содержанию илистой фракции (табл. 1 и 3). Представленные значения (табл. 3) были получены методом отмучивания ([Горбунов, 1971](#)) – традиционным для минералогического анализа методом. Сопоставление результатов содержания ила указанными методами выявляют некоторые отличия значений для разных горизонтов. Диспергирование почвенной массы методом Качинского не обеспечивает полного диспергирования агрегатов, в отличие от пробоподготовки образцов по Горбунову с последующим исчерпывающим отмучиванием водой. В результате выход илистой фракции при отмучивании оказался выше, чем при выполнении гранулометрического анализа с использованием пирофосфата по методу Качинского. Такая картина наблюдается в данном солонце только в верхних гумусированных горизонтах, а в нижних – оба метода обеспечивают сопоставимый выход илистой фракции. В данной статье профильное распределение гранулометрических фракций охарактеризовано на основе данных, полученных методом Качинского, который используется наиболее широко.

Таблица 2. Расчетный состав кластогенных минералов фракции > 1 мкм силикатной части солонца. Разрез ЗК-2. Возраст территории около 17 тыс. лет.

Table 2. The estimated composition of clastogenic minerals fractions > 1 µm of the silicate part of the solonetz. Soil pit ЗК-2. The age of the territory is about 17 thousand years

Генетический горизонт	Глубина отбора, см	Содержание фракции, %	Содержание минералов в почве, %						Мгп, кг/100 кг породы						
			КВ	П	КШ	С	Х	КЛ	КВ	П	КШ	С	Х	КЛ	сумма
SEL	0–5	88.3	42.8	18.7	16.5	5.1	3.8	1.1	28.3	12.3	11.2	3.4	2.5	0.7	58.4
BSN1	5–16	60.3	23.9	15.1	14.8	3.3	2.3	0.9	18.1	11.5	11.2	2.5	1.7	0.7	45.7
BSN2	16–26	48.4	15.7	14.4	12.8	2.9	1.9	0.8	13.7	12.6	11.2	2.5	1.7	0.7	42.4
BSN3s	26–35	71.7	27.0	18.5	12.4	6.6	4.7	2.5	24.4	16.7	11.2	6.0	4.3	2.3	64.8
BCAs,cs	35–45	73.3	34.7	14.9	10.9	6.2	5.4	3.4	35.8	14.3	11.2	6.4	5.6	3.5	76.7
BCAnc	45–60	72.1	33.0	15.7	11.6	5.5	2.9	3.4	31.8	15.1	11.2	5.3	2.8	3.3	69.5
Cca,s	110–130	69.8	32.4	12.4	11.2	5.6	4.5	2.5	32.4	12.4	11.2	5.6	4.5	2.5	67.5

Примечание. Мгп – содержание минерала в горизонте, приведенное к содержанию КПШ в породе; Мд – убыль (прибавка) минерала в сравнении с породой; КВ – кварц; П - плагиоклазы; КШ – калиевые полевые шпаты; С – слюды; Х – хлорит; КЛ – каолинит; Бпм – “баланс” кластогенных минералов.

Продолжение таблицы 2. Расчетный состав кластогенных минералов фракции > 1 мкм силикатной части солонца. Разрез 3К-2. Возраст территории около 17 тыс. лет.

Continued table 2. The estimated composition of clastogenic minerals fractions > 1 µm of the silicate part of the solonetz. Soil pit 3K-2. The age of the territory is about 17 thousand years

Генетический горизонт	Глубина отбора, см	Содержание фракции, %	Мд, кг/100кг породы						
			КВ	П	КШ	С	Х	КЛ	Бпм
SEL	0–5	88.3	-4.1	-0.1	0.0	-2.2	-2.2	-2,5	-11.9
BSN1	5–16	60.3	-13.3	-0.9	0.0	-3.1	-2.8	-1.8	-20.9
BSN2	16–26	48.4	-17.7	0.2	0.0	-3.1	-2.8	-1.8	-25.2
BSN3s	26–35	71.7	-7.0	4.3	0.0	0.4	-0.2	-0.2	-2.8
BCAs,cs	35–45	73.3	4.4	1.9	0.0	0.8	1.1	1.0	9.1
BCAnc	45–60	72.1	0.4	2.7	0.0	-0.3	-1.7	0.8	1.9
Cca,s	110–130	69.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Примечание. Мгп – содержание минерала в горизонте, приведенное к содержанию КПШ в породе; Мд – убыль (прибавка) минерала в сравнении с породой; КВ – кварц; П - плагиоклазы; КШ – калиевые полевые шпаты; С – слюды; Х – хлорит; КЛ – каолинит; Бпм – “баланс” кластогенных минералов.

Таблица 3. Расчетный состав глинистых минералов фракции < 1 мкм и общий расчетный баланс минералов. Разрез ЗК-2

Table 3. The estimated composition of clay minerals fractions <1 μm and the overall calculated balance of minerals. Soil pit ЗК-2

Генетический горизонт	Глубина, отбора, см	Фракция < 1 мкм, %	Содержание минералов в почве, %				Мгп, кг/100 кг породы				
			СМ	И	Х	КЛ	СМ	И	Х	КЛ	Сумма
SEL	0–5	11.7	2.6	6.1	0.7	2.3	1.7	4.0	0.5	1.5	7.7
BSN1	5–16	39.7	20.6	11.8	1.8	5.5	15.6	9.0	1.4	4.2	30.1
BSN2	16–26	51.6	23.7	17.0	1.4	9.4	20.8	14.9	1.2	8.2	45.1
BSN3s	26–35	28.3	11.7	9.9	1.3	5.4	10.6	8.9	1.2	4.9	25.6
BCAs,cs	35–45	26.7	10.6	9.6	1.4	5.1	1.9	9.9	1.4	5.3	26.5
BCAnc	45–60	27.9	10.1	9.7	2.0	6.3	12.6	9.7	1.9	6.1	31.4
Csa,s	110–130	30.2	11.7	8.3	1.5	6.4	11.7	8.3	1.5	6.4	27.9

Примечание. Мгп – содержание минерала в горизонте, приведенное к содержанию КППШ в породе; Мд – убыль (прибавка) минерала в сравнении с породой; СМ – смектит; И – иллит; Х – хлорит; КЛ – каолинит; Бпм – “баланс” кластогенных минералов; Бгм – “баланс” глинистых минералов; Бо – общий “баланс” минералов.

Продолжение таблицы 3. Расчетный состав глинистых минералов фракции < 1 мкм и общий расчетный баланс минералов. Разрез 3К-2

Continued table 3. The estimated composition of clay minerals fractions <1 μm and the overall calculated balance of minerals. Soil pit 3K-2

Генетический горизонт	Глубина, отбора, см	Фракция < 1 мкм, %	Мд, кг/100 кг породы					“Баланс” минералов		
			СМ	И	Х	КЛ	Бгм	Блм	Бгм	Бо
SEL	0–5	11.7	-10.0	-4.3	-1.0	-4.9	-20.2	-11.9	-20.2	-32.1
BSN1	5–16	39.7	3.9	0.7	-0.1	-2.2	2.2	-20.9	2.2	-18.6
BSN2	16–26	51.6	9.1	6.6	-0.3	1.8	17.2	-25.2	17.2	-8.0
BSN3s	26–35	28.3	-1.1	0.6	-0.3	-1.5	-2.3	-2.8	-2.3	-5.2
BCAs,cs	35–45	26.7	-0.8	1.6	-0.1	-1.1	-1.4	9.1	-1.4	7.7
BCAnc	45–60	27.9	0.6	1.4	0.4	-0.3	3.5	1.9	3.5	4.3
Csa,s	110–130	30.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Примечание. Мгп – содержание минерала в горизонте, приведенное к содержанию КППШ в породе; Мд – убыль (прибавка) минерала в сравнении с породой; СМ – смектит; И – иллит; Х – хлорит; КЛ – каолинит; Блм – “баланс” кластогенных минералов; Бгм – “баланс” глинистых минералов; Бо – общий “баланс” минералов.

Солонец характеризуется неоднородным солевым профилем и разделяется по степени засоления на три части (рис. 1а, 1б). Надсолонцовый горизонт SEL не засолен, что обусловлено выщелачиванием солей атмосферными осадками.

Наибольшее засоление в средней части профиля отмечается в солонцовых горизонтах. Максимальное содержание солей достигает значения более 2% и постепенно снижается с глубиной, оставаясь высоким. Качественный состав засоления по профилю не меняется и характеризуется хлоридно-сульфатным магниевонатриевым составом.

С минералогической точки зрения, на относительную однородность профиля указывает однонаправленное изменение содержание КППШ, а также нормальные профили выветривания других кластогенных минералов исследуемой почвы. Под нормальным профилем мы понимаем накопление с поверхности и плавное убывание с глубиной устойчивых к выветриванию кластогенных минералов с жесткой кристаллической решеткой. Следует признать, что традиционные доказательства исходной однородности почвообразующих пород в настоящем исследовании не приведены, поэтому исходим из предположения о присутствии таковой на основании ранее перечисленных признаков.

Содержание кластогенных и глинистых минералов в профиле солонца имеет ряд особенностей (табл. 2). В элювиальной толще горизонта SEL установлено относительное накопление следующих минералов: кварца, плагиоклаза, КППШ, слюды, – при этом количество хлорита, наоборот, уменьшается, а количество глинистых минералов минимально для всего профиля. В иллювиальной части наблюдается обратная картина: сумма кластогенных минералов находится в минимуме, а суммарное количество глинистых – увеличивается и максимально для всего профиля солонца. Аналитические данные профильного распределения ила, кластогенных и глинистых минералов ([Варламов и др., 2018](#)) соответствуют элювиально-иллювиальной модели распределения указанных компонентов почвы, а почвообразование привело к профильным различиям минералогического состава между надсолонцовыми, солонцовыми и подсолонцовыми горизонтами.

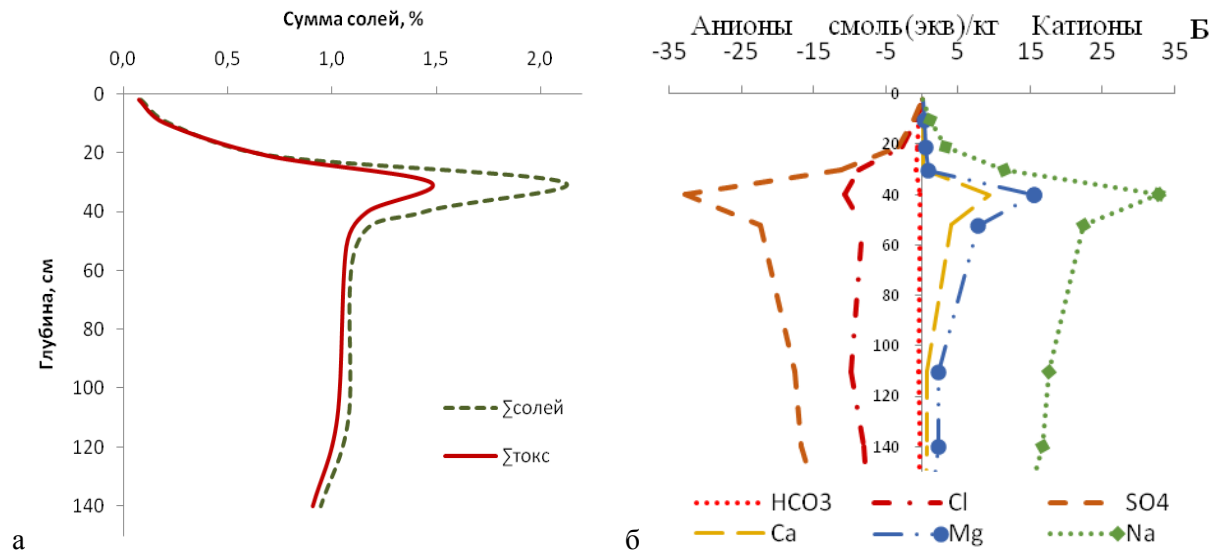


Рис. 1. Распределение общей суммы солей, суммы токсичных солей (а) и солевой профиль солонца (б).
Fig. 1. Distribution of the total amount of salts, the amount of toxic salts (a) and the salt profile of the solonetz (b).

Перечисленные особенности профильного распределения глинистых и кластогенных минералов типичны для почвы указанного типа и неоднократно описывались в литературе ([Соколова и др., 2005](#); [Травникова, 1976, 1977](#); [Чижикова и др., 1977, 2017](#)).

Расчетный состав кластогенных минералов, по сравнению с составом условной породы для надсолонцовых и солонцовых горизонтов, отрицательный (табл. 2, рис. 2).

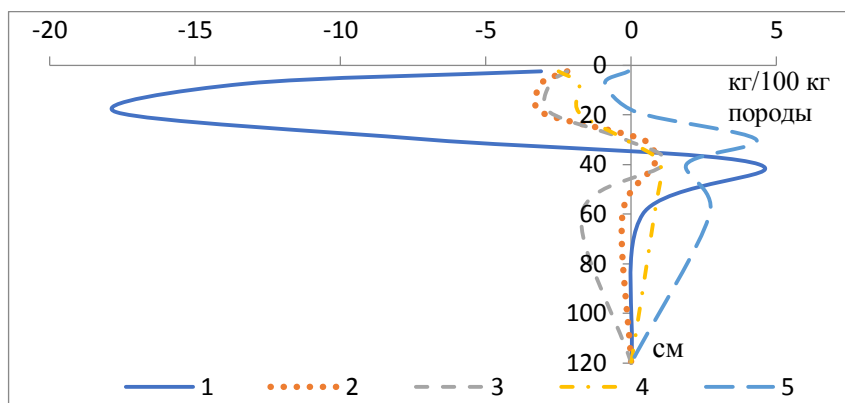


Рис. 2. Убыль, прибавка Мд кластогенных минералов (фракция $>1 \mu\text{м}$) в сравнении с породой: 1 – Кварц; 2 – Слюда; 3 – Хлорит; 4 – Каолинит; 5 – Плагиоклаз, кг/100 кг породы.

Fig. 2. Decline increase Md of clusters minerals (fraction $>1 \mu\text{m}$) in comparison with rock: 1 – Quartz; 2 – Micas; 3 – Chlorite; 4 – Kaolinite; 5 – Plagioclase, kg/100 kg of rock.

Наибольшие потери установлены для следующих минералов: кварца, хлорита, слюды, плагиоклаза, – суммарные потери которых составили в надсолонцовом горизонте SEL более -10 кг/100 кг породы, а в солонцовых горизонтах BSN – более -25 кг/100 кг породы. Среди указанных кластогенных минералов максимальные потери в солонцовых горизонтах установлены для кварца, которые составили в максимуме около -17 кг/100кг породы. Рассчитанная нами величина потери кварца является максимальной в профиле. Обратим внимание, что учет глинистого минерала каолинита во фракции $>1 \mu\text{м}$ связан с суммарным итогом

вым учетом содержания минералов во фракциях 1–5; 5–10; >10 мкм, выделенных методом Горбунова ([Горбунов, 1971](#)).

В переходной к илу фракции тонкой пыли (1–5 мкм) количество каолинита было существенным. В связи с этим количественная оценка глинистого минерала каолинита также велась во фракции >1 мкм наряду с кластогенными минералами вместе с расчетом соотношения минералов по методу Кука. Расчетные потери каолинита максимальные с поверхности с -2.5 кг/100 кг породы с плавным уменьшением вглубь профиля. В аккумулятивно-карбонатном горизонте фиксируется незначительная прибавка каолинита – около 1 кг/100 кг породы.

В профиле фиксируется небольшая потеря плагиоклаза (около -1 кг/100 кг породы) до гор. BSN3s, где расчетные значения меняются на противоположные – +4 кг/100 кг породы. Положительные расчетные значения содержания плагиоклаза в нижней части солонцового горизонта можно связать с перемещением тонкодисперсного материала в пределах горизонта. Переходные к материнской породе аккумулятивно-карбонатные горизонты ВСА характеризуются положительными расчетными значениями кластогенных минералов, которые в сумме составляют 9 кг/100 кг породы.

Максимальная прибавка установлена для кварца – более 4 кг/100 кг породы, около 2 кг/100 кг породы приходится на плагиоклаз, а слюды, хлорит имеют значения в пределах 1 кг/100 кг породы (табл. 2). Эти факты свидетельствуют, по-видимому, о литологической неоднородности профиля. Таким образом, расчетное количество кластогенных минералов, по сравнению с породой, отрицательное для надсолонцовых и солонцовых горизонтов с отрицательным максимумом в солонцовых горизонтах и положительное для переходных аккумулятивно-карбонатных горизонтов. По всей вероятности, физическое дробление кварца, слюды и других минералов фракции >1 мкм наиболее интенсивно происходит в верхних горизонтах. Оно сопровождается щелочным гидролизом и идет с меньшей интенсивностью, чем физическое дробление, о чем свидетельствуют значительные отрицательные расчетные значения кластогенных минералов и положительные значения по глинистым минералам. Очевидно, что максимум содержания со-

лей и максимальные расчетные потери минералов находятся во взаимосвязи.

Расчет количества глинистых минералов выявил принципиально иную картину. В надсолонцовых гор. SEL, так же как и для кластогенных минералов, фиксируется суммарный максимум (20 кг/100 кг породы) отрицательных значений по всем глинистым минералам (табл. 3., рис. 3). Характер распределения расчетных значений по отдельным глинистым компонентам имеет следующие особенности: в надсолонцовом горизонте значения отрицательные по всем глинистым минералам с максимумом по СМ фазе -10 кг, а по иллиту и каолиниту с примерно одинаковыми значениями находится в пределах -4 кг и по хлориту – около -1 кг/100 кг породы. В солонцовых горизонтах картина меняется, значения по СМ фазе и иллиту имеют положительные значения с увеличением вглубь профиля от +4 до +9 кг и более и от +1 до +6 кг 100 кг породы соответственно. Что касается иллита, то, по всей вероятности, физическое дробление слюдистых минералов крупных фракции до размера илистых частиц приводит к увеличению его содержания в профиле до +6 кг/100 кг породы. В пользу факта физического дробления минералов следует отметить проявление у иллитовых минералов илистой фракции унаследованного характера слюдистых минералов фракций >1 мкм, которое подтверждается хорошей их окристаллизованностью, о чем свидетельствуют острые симметричные диагностические рефлексy 1.0 и 0.5 нм дифрактограмм ([Варламов и др., 2018](#)) нижней части солонцовой толщи гор. BSN3 и верхней части гор. ВСА. При этом аргументированность факта увеличения содержания иллита в надсолонцовом горизонте и в верхней части солонцовых горизонтов, которое происходит за счет лабильных структур СМ-фазы, не вызывает сомнений ([Варламов и др., 2018](#)). На основании сказанного можно заключить, что накопление иллитов в верхних горизонтах происходит не только за счет иллитизации (необменной фиксации калия лабильными структурами), но и за счет физического дробления слюдистых минералов, заключенных в составе фракций >1 мкм. Расчетные значения хлорита и каолинита надсолонцовых и солонцовых горизонтов находятся в пределах небольших отрицательных и положительных величин. Подобный диапазон значений по

всем минералогическим компонентам имеют и аккумулятивно-карбонатные горизонты ВСА.

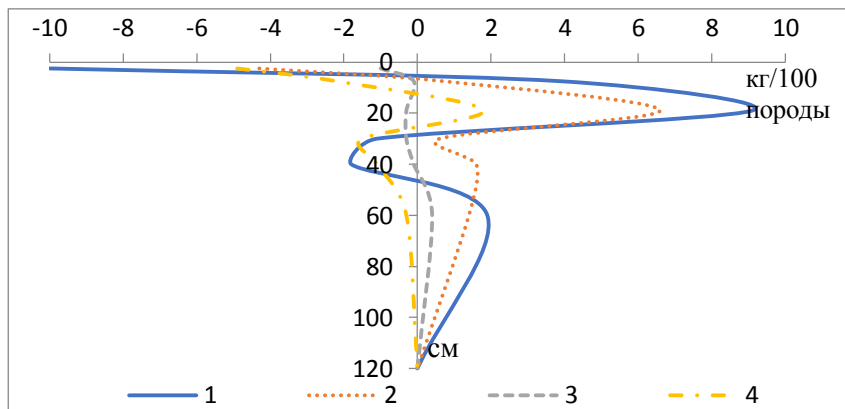


Рис. 3. Убыль, прибавка Мд глинистых минералов (фракция $<1 \mu\text{м}$) в сравнении с породой: 1 – СМ минералы; 2 – Иллит; 3 – Хлорит; 4 – Каолинит, кг/100 кг породы.

Fig. 3. Decline increase Md of clay minerals (fraction $<1 \mu\text{m}$) in comparison with rock: 1 – CM minerals; 2 – Illit; 3 – Chlorite; 4 – Kaolinite, kg/100 kg of rock.

По характеру распределения хлоритов в солонце можно предположить, что они тоже переходят из более крупных фракций в тонкодисперсную (илистую) в результате физического дробления. Вместе с тем хлориты подвергаются значительному разрушению как наименее устойчивые, особенно в условиях щелочной обстановки рассматриваемой почвы. В результате в профиле данного солонца наблюдается вариабельное распределение хлорита. Как уже отмечалось, скорость растворения минимальна при нейтральной реакции и она значительно возрастает при переходе к щелочной реакции среды. Разрушение минералов может замедляться, вероятно, под влиянием такого фактора, как наличие гумусовых пленок на поверхности минеральных частиц, что и наблюдается в содержащих гумус горизонтах. Содержание глинистых минералов (ГМ) по отношению к группе кластогенных минералов может увеличиваться, но это должно быть подтверждено соответ-

ствующим снижением суммарного содержания кластогенных минералов как источников образования глинистых минералов, что было зафиксировано для надсолонцового и солонцового горизонтов. Обращает на себя внимание небольшое (+3 кг/100 кг породы) увеличение всей группы ГМ в аккумулятивно карбонатном горизонте на глубине 40–60 см, в карбонатной среде которого исключается синтез и трансформации ГМ. С учетом указанных обстоятельств увеличение содержания ГМ должно сопровождаться соответствующим снижением содержания кластогенных минералов, чего не наблюдается. Этот факт указывает на специфическую литологическую неоднородность.

Суммарный расчет минералов был установлен суммированием убыли (прибавки) кластогенных и глинистых минералов (табл. 3, рис. 3). В профиле солонца установлена убывающая с глубиной потеря минералов с максимумом в -31 кг/100 кг породы в надсолонцовом SEL горизонте. В солонцовой части профиля, несмотря на положительные значения по глинистым минералам, итоговая сумма имеет отрицательные значения. Данные распределяются с равномерным убыванием потерь от -18 кг/100 кг породы в гор. BSN1 до -5 кг/100 кг породы в гор. BSN3. В аккумулятивно-карбонатных горизонтах ВСА расчетные цифры имеют положительные значения: от +7 до +4 кг/100 кг породы.

Разность дефицита и прибавки глинистых и кластогенных минералов мы относим как к процессу лессиважа (иллимеризации), так и к потере минеральных компонентов всем профилем в результате щелочного гидролиза. В пользу последнего предположения (щелочного гидролиза) свидетельствуют полученные отрицательные значения (табл. 2) для весьма устойчивого к выветриванию кварца, а внушительные потери этого минерала мы связываем с общеизвестным фактом ([Горбунов, 1963](#), [1976](#)) о высокой растворимости и низкой устойчивости кварца в щелочной среде. Это обстоятельство подтверждается существенным физическим дроблением пылеватых фракций, вследствие увеличения поверхности минералов уменьшается их устойчивость к выветриванию.

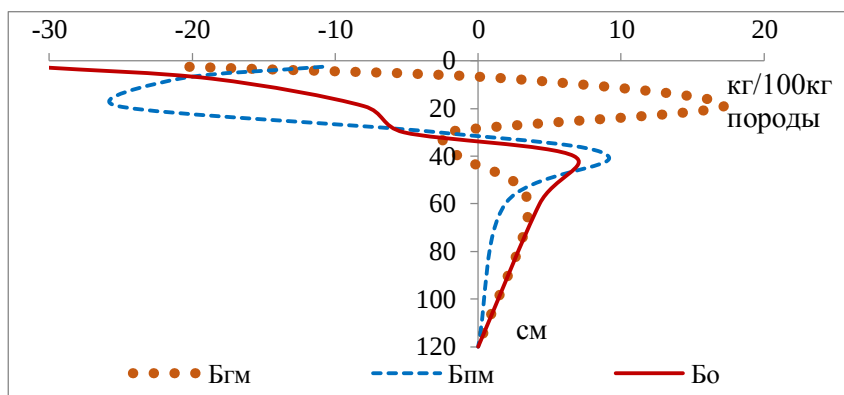


Рис. 4. Суммарный расчет минералов, Бгм – значения глинистых минералов, Бпм – значения кластогенных минералов; Бо – суммарный расчет минералов, кг/100 кг породы.

Fig. 4. Total calculation of minerals, Бгм – values of clay minerals, Бпм – values of cluster minerals, Бо – total calculation of minerals, kg/100 kg of rock.

Следующим доводом может служить указанное нами ранее (Варламов и др., 2018) супердисперсное состояние смешанослойных минералов, при котором блоки минералов расслаиваются на частицы с минимальным количеством пакетов и сопровождаются большим количеством аморфного вещества, что обычно происходит при содовом засолении. Очевидно, что кроме лессиважа в дифференциации профиля принимает участие и процесс щелочно-го гидролиза.

Еще один важный момент – это наличие совмещенных максимумов содержаний ила и лабильных глинистых минералов в нем, что является однозначной характеристикой лессиважа как основного процесса дифференциации минералогической части профиля изученного солонца. При одном щелочном гидролизе за счет разной устойчивости ГМ такое совмещение было бы невозможно. В данной почве потери ГМ в результате щелочного гидролиза значительно нивелируются физической диспергацией крупных фракций, в результате этого происходит пополнение количества ГМ. Указанными обстоятельствами объясняются положительные расчетные значения ГМ солонцового горизонта. При этом

количество перемещенных вглубь профиля глинистых и тонкодисперсных минералов значительно меньше по сравнению с общим количеством указанных веществ в горизонте. Имеющиеся внутригоризонтные отличия минералогических компонентов, главным образом ГМ, позволяют объяснить детальный минералогический анализ ([Варламов и др., 2018](#)). Выявленные кристаллохимические отличия глинистых компонентов, особенно минералов смектитовой фазы, в пределах солонцовых BSN горизонтов свидетельствуют о том, что вымывается сложное по минералогическому составу вещество, при этом разные его компоненты (илисто-коллоидные и тонкодисперсные), по-видимому, вымыты в разные периоды, в результате формируется неоднородность в солонцовой части профиля. К изложенному важно добавить, что в профиле сказывается как изоморфизм и структурная изменчивость одних и тех же минералов, так и их трансформации под действием процессов выветривания и почвообразования. Относительное увеличение доли кластогенных минералов является суммарным результатом как разрушения частиц, выноса их продуктов в форме окислов, так и обеднения верхней части профиля частицами <1 мкм вследствие пептизирования глинистых минеральных частиц. Установленные расчетные потери минералов относительно породы подтверждают, что в почвенные растворы поступает много оснований, которые пополняют их собственные запасы, в том числе солями натрия и магния, это вызывает быструю коагуляцию частиц из растворов и дисперсий и приводит к формированию непосредственно под горизонтом SEL компактного иллювиального по илу горизонта. Таким образом, минералогическими компонентами создаются условия более длительного сохранения в этих почвах солонцовых свойств, происходит формирование четко обособленных по минералогическим признакам солонцовых горизонтов.

Возвращаясь к максимальной расчетной потере кварца, установленной в солонцовых горизонтах и составляющей более 17 кг/100 кг породы, обращает на себя внимание высокое ее значение. Однако, это вступает в противоречие с количеством выbranного авторами устойчивого “свидетеля” – КПШ, содержание которого в расчете на почву в целом равномерно. Такой эффект не может в полной мере объясняться накопительным разрушением и

необратимостью процесса дезинтеграции кластогенных минералов. Сравнение полученных показателей изменения минеральной массы почв с литературными данными затруднительно по причине не только различающихся формул, но и в результате использования других “свидетелей”. Отметим следующие сопутствующие расчетам обстоятельства: гор. ВСА (35–45см) характеризуется минимальным значением содержания КПШ и максимальным содержанием в профиле кварца. В результате итоговые расчеты привели к положительным значениям всей группы кластогенных минералов. Исходя из наших допущений касательно однородности почвообразующей породы, а также относительно аккумулятивно-карбонатного горизонта, где новообразования другими путями кроме деградационной трансформации слоистых силикатов в карбонатной среде исключены, следует ожидать только нулевых или незначительно отрицательных расчетных значений, однако этого не наблюдается. Эти факты могут свидетельствовать об особенной (с высоким содержанием кварца) неоднородности профиля. При этом профильное размещение данного литологического слоя гор. ВСА фиксируется положительными значениями кластогенных минералов и в меньшей мере глинистых (табл. 2, 3). Небольшая суммарная прибавка (+3 кг/100 кг породы) глинистых минералов в аккумулятивно-карбонатном горизонте находится во взаимосвязи не с потерей, как ожидалось для этого горизонта, а с прибавкой кластогенных минералов, что также свидетельствует о неоднородности профиля. Представляется вероятным, что данный факт сказался и на потерях кварца в гор. BSN.

Обобщая проведенные исследования, появляется представление о количественных параметрах и направлениях преобразования минеральной части почвенного профиля. Подтверждается, что минералы в одних и тех же условиях подвергаются гидролизу с разной скоростью в соответствии со своими термодинамическими и кинетическими характеристиками. Результатом этого является дифференциация почвенного профиля по минералогическому составу. Использование значений проведенных расчетов позволило оценить относительное распределение масс кластогенных и глинистых минералов, накапливающихся на месте и мигрирующих в пределах средней и частично нижней части профиля. На основе

количественных аналитических данных показано, что в дифференциации твердой фазы типичной для северного Прикаспия почвы заметную роль играют как процессы лессиважа (иллимеризации), так и щелочного гидролиза. Однако для полноценной количественной оценки роли процесса растворения силикатов на фоне нисходящего перемещения суспензий в профиле солонца примера одного разреза явно недостаточно. Необходимо иметь данные не только солонца, но и сопряженных почв всего ряда солонцового комплекса, а таких данных пока крайне мало. Полученные нами количественные показатели профильного расчетного распределения минералов следует подтвердить или опровергнуть на почвах сопряженных территорий, или проверить величины преобразований по сравнению с фоновыми почвами данного комплекса. Предложенная система, основанная на методе расчетов кластогенных и глинистых минералов, позволила иным способом проанализировать элювиально-иллювиальную дифференциацию минеральной части почвы, но вместе с тем наличие литологической неоднородности профиля с определенным искажением влияет и на масштабы изменений минеральных компонентов почвы.

ВЫВОДЫ

Дифференциация элювиальной части солонца сопровождается количественным перераспределением отдельных минералогических компонентов по профилю и качественными химико-минералогическими изменениями минеральной массы. Продукты выноса, главным образом в виде смектита, иллита, аккумулируются в иллювиальной части профиля.

Накопление иллита в поверхностных горизонтах объясняется не только процессами иллитизации, но и значительным физическим дроблением слюдистых минералов крупных фракций до размера илистых частиц.

Максимальные размеры потерь кластогенных и глинистых минералов произошли в надсолонцовом горизонте SEL и составляют соответственно -10 и -20 кг/100 кг, а суммарное расчетное количество минералов составило более -30 кг/100 кг породы.

В солонцовых BSN горизонтах имеются признаки как лессиважа, так и локального разрушения в результате щелочного

гидролиза минералов. Суммарные потери кластогенных минералов достигают -25 кг/100 кг породы, а прибавка по глинистым – +17 кг/100 кг породы, при суммарном расчетном количестве от -8 кг до -19 кг/100 кг породы. Значительные потери кварца свидетельствуют о его слабой устойчивости при щелочном гидролизе.

В аккумулятивно-карбонатных горизонтах ВСА положительные значения кластогенных минералов и суммарных расчетных значений с учетом глинистых до +7 кг/100 кг породы свидетельствуют о выявленной литологической неоднородности почвообразующих пород профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.Е.* Минералогия почвообразования в степной и лесостепной зонах Молдовы. Диагностика, параметры, факторы, процессы. Кишинев: 1999, 241 с.
2. *Алексеев В.Е.* Способ оценки минералогического состояния силикатной части черноземов // Почвоведение. 2012. № 2. С. 189–199.
3. *Арсланов Х.А., Свиточ А.А., Чепалыга А.Л. и др.* О возрасте Хвалыньских отложений Каспийского регион по данным датирования моллюсков 14С и 230ТН/234U методами // Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2013. С. 34–36.
4. *Варламов Е.Б., Лебедева М.П., Чурилин Н.А., Чурилина А.Е.* Особенности профильного распределения минералов во фракциях разной размерности в солонце корковом светлом сухостепной зоны юга России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 93. С. 144–172. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-93-144-168](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-93-144-168).
5. *Горбунов Н.И.* Высокодисперсные минералы и методы их изучения их изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 302 с.
6. *Горбунов Н.И.* Методика подготовки почв к минералогическим анализам // Методы минералогического и микроморфологического изучения почв. М.: Наука, 1971. С. 5–15.
7. *Градусов Б.П.* Рентгендифрактометрический метод в минералогических исследованиях почв // Почвоведение. 1967. № 10. С. 127–137.
8. *Градусов Б.П.* Минералы со смешанослойной структурой в почвах. М.: Изд-во АН СССР. 1976. 127с.
9. *Градусов Б.П., Травникова Л.С., Чижикова Н.П.* Минералогический состав глинистого материала почв // Структура, функционирование и

- эволюция системы биогеоценозов Барабы. Новосибирск: Наука, 1974. Т. 1. С. 153–183.
10. *Коссович П.С.* Краткий курс общего почвоведения. Петроград: Тип. Альтшулера, 1916. 276 с.
11. *Макеев А.О., Макеев О.В.* Почвы с текстурно-дифференцированным профилем основных криогенных ареалов севера Русской равнины. Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1989. 272 с.
12. *Прудникова Е.Ю., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Чурилина А.Е.* Дифференциация и баланс минералов при трансформации открытой поверхности пахотных почв под воздействием атмосферных осадков // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 105–131. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-105-131](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-105-131).
13. *Розанов Б.Г.* Генетическая морфология почв. М.: Изд-во МГУ, 1975. 292 с.
14. *Роде А.А.* Избранные труды в Т.4. Подзолообразовательный процесс. М.: ГНУ Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2008. 480 с.
15. *Седлецкий И.Д.* Гензис минералов почвенных коллоидов в связи с типами выветривания и почвообразования // Природа. 1938. № 1. С. 34–44.
16. *Симонов Г.А.* Состояние и эволюция минеральной массы почв зонального ряда не покровных суглинках: Генетические аспекты: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Сыктывкар, 2000.
17. *Симонов Г.А., Соколова Т.А.* Некоторые параметры для количественной оценки степени выраженности элювиального и элювиально-иллювиального почвенных процессов // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1981. № 3. С. 3–11.
18. *Симонов Г.А., Соколова Т.А.* Некоторые параметры для количественной оценки степени выраженности элювиального и элювиально-иллювиального почвенных процессов // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1982. № 1. С. 27–35.
19. *Солдатова Е.Ф.* Сухостепные почвы с дифференцированным профилем на древних корях выветривания Терсекского плато (Северный Казахстан) // Почвоведение. 1989. № 7. С. 24–37.
20. *Соколова Т.А.* Разрушение глинистых минералов в модельных опытах и в почвах: позмозные механизмы, скорость, диагностика (анализ литературы) // Почвоведение. 2013. № 2. С. 201–218.
21. *Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешица И.И.* Глинистые минералы в почвах. Тула, 2005. 336 с.

22. *Травникова Л.С.* Минералогический состав фракции <1 m некоторых солонцов черноземной и каштановой зон // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1968. Вып. 2. С. 52–60.
23. *Травникова Л.С.* О строении и структуре основного компонента глинистого материала содовых солонцов // Докл. АН СССР. 1976. № 6. С. 1425–1428.
24. *Травникова Л.С.* О географии и генезисе глинистого материала солонцовых почв // Тез. докл. 5-го съезда ВОП. Вып. 1. Минск, 1977. С. 156–157.
25. *Травникова Л.С., Мясников В.В.* Особенности профиля глинистого материала почв солонцового профиля лимана Б. Царын // Почвоведение. 1967. № 10. С. 127–137.
26. Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 240 с.
27. *Халчева Т.А.* Степень выветроелости и условия формирования разновозрастных лессовых горизонтов Русской равнины: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Москва, 1974. 31 с.
28. *Чепалыга А.Л., Пирогов А.Н.* Влияние вод Хвалынского бассейна древнего Каспия на формирование долины Маныча и его ландшафтов // Роль особо охраняемых природных территорий в сохранении биоразнообразия. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2006. С. 409–415.
29. *Чижикова Н.П., Градусов Б.П., Травникова Л.С.* Особенности профилей глинистого материала почв Барабинской лесостепи в связи с их эволюцией // Науч. докл. высш. шк. биол. наук. 1973. № 8. С. 99–106.
30. *Чижикова Н.П., Хитров Н.Б., Самсонова А.А., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Роговнева Л.В., Чевердин Ю.И.* Минералы трехкомпонентной пятнистости агрочерноземов Каменной Степи // Почвоведение. 2017. № 4. С. 468–482.
31. *Bar-On P., Shainberg J.* Hydrolysis and decomposition of Na/montmorillonite in distilled water // Soil Science. 1970. Vol. 109. No. 4. P. 241–246.
32. *Biscaye R.E.* Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent Seas and Oceans // Geological Soc. Am. Bull. 1965. Vol. 76. No. 7. P. 803–832.
33. *Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zemmels I.* Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-ray Mineralogy Laboratory, Deep Sea Drilling Project, University of California, Riverside // In: Init. Repts. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1975. P. 999–1007.
34. *Egli M., Fitze P.* Formulation of pedologic mass balance based immobile elements: a revision // Soil Science. 2000. Vol. 165. No. 5. P. 437–443.

35. Kamil J., Sheinberg I. Hydrolysis of sodium montmorillonite in sodium chlorite solutions // *Soil Science*. 1968. Vol. 106. No. 3. P. 193–199.
36. Chou L., Wollast R. Steady-state kinetics and dissolution mechanisms of albite // *American Journal of Science*. 1985. Vol. 285. P. 963–993.
37. Smeck N.E., Wilding L.P. Quantitative evaluation of pedon formation in calcareous glacial deposits in Ohio // *Geoderma*. 1980. Vol. 24. Iss. 1. P. 1–16.

REFERENCES

1. Alekseev V.E., *Mineralogiya pochvoobrazovaniya v stepnoi i lesostepnoi zonakh Moldovy. Diagnostika, parametry, factory, protsessy* (Mineralogy of soil formation in the steppe and forest-steppe zones of Moldova. Diagnostics, parameters, factors, processes), Kishinev: 1999, 241 p.
2. Alekseev V.E., Sposob otsenki mineralogicheskogo sostoyaniya silikatnoi chasti chernozemov (Method for assessing the mineralogical state of the silicate part of chernozems), *Pochvovedenie*, 2012, No. 2, pp. 189–199.
3. Arslanov Kh.A., Svitoch A.A., Chepalyga A.L. et al., O vozraste Khvalynskikh otlozhenii Kaspiiskogo region po dannym datirovaniya mollyuskov 14S i 230TH/234U metodami (About the age of the Khvalynsk deposits in the Caspian region according to the dating of mollusks by 14C and 230TH / 234U methods), In: *Fundamental'nye problemy kvartera, itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dal'neishikh issledovaniy* (Fundamental problems of the quarter, the results of the study and the main directions of further research), Rostov-na-Donu: YuNTs RAN, 2013, pp. 34–36.
4. Varlamov E.B., Lebedeva M.P., Churilin N.A., Churilina A.E., Profile distribution of minerals in textural fractions of different dimensions in the solonetz in dry steppe zone of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 93, pp. 144–168, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-93-144-168](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-93-144-168).
5. Gorbunov N.I., *Vysokodispersnye mineraly i metody ikh izucheniya ikh izucheniya* (Finely dispersed minerals and methods of their study), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, 302 p.
6. Gorbunov N.I., Metodika podgotovki pochv k mineralogicheskim analizam (Methods of soil preparation for mineralogical analyzes), In: *Metody mineralogicheskogo i mikromorfologicheskogo izucheniya pochv* (Methods of mineralogical and micromorphological studies of soils), Moscow: Nauka, 1971, pp. 5–15.
7. Gradusov B.P., Rentgendifraktoметрический метод в минералогических исследованиях почв (X-ray diffractometric method in mineralogical studies of soils), *Pochvovedenie*, 1967, No. 10, pp. 127–137.

8. Gradusov B.P., *Mineraly so smeshanosloinoi strukturoi v pochvakh* (Minerals with a mixed layer structure in soils), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1976, 127 p.
9. Gradusov B.P., Travnikova L.S., Chizhikova N.P., Mineralogicheskii sostav glinistogo materiala pochv (Mineralogical composition of clay soil material), In: *Struktura, funktsionirovanie i evolyutsiya sistemy biogeotsenozov Baraby* (Structure, functioning and evolution of the system of biogeocenoses in Baraba), Novosibirsk: Nauka, 1974. Vol. 1, pp. 153–183.
10. Kossovich P.S., *Kratkii kurs obshchego pochvovedeniya* (A short course in general soil science), Petrograd: Tip. Al'tshulera, 1916, 276 p.
11. Makeev A.O., Makeev O.V., *Pochvy s teksturno-differentsirovannym profilem osnovnykh kriogennykh arealov severa Russkoi ravniny* (Soils with a texture-differentiated profile of the main cryogenic areas in the north of the Russian Plain), Pushchino: ONTI NTsBI AN SSSR, 1989, 272 p.
12. Prudnikova E.Yu., Varlamov E.B., Churilin N.A., Churilina A.E., Differentiation and balance of minerals during transformation of the open surface of arable soils under the impact of rain, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 105–131, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-105-131](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-105-131).
13. Rozanov B.G., *Geneticheskaya morfologiya pochv* (Genetic morphology of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1975, 292 p.
14. Rode A.A., *Izbrannye trudy v T.4. Podzoloobrazovatel'nyi protsess* (Selected works in Vol. 4. Podzol formation process), Moscow: GNU Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva Rossel'khozakademii, 2008, 480 p.
15. Sedletskii I.D., Genzis mineralov pochvennykh kolloidov v svyazi s tipami vyvetriviya i pochvoobrazovaniya (Genzis minerals of soil colloids in connection with the types of weathering and soil formation), *Priroda*, 1938, No. 1, pp. 34–44.
16. Simonov G.A., *Sostoyanie i evolyutsiya mineral'noi massy pochv zonal'nogo ryada ne pokrovnykh suglinkakh: Geneticheskie aspekty: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (The state and evolution of the mineral mass of soils of the zonal series of non-cover loams: Genetic aspects: Extended abstract of Doct. biol. sci. thesis), Syktyvkar, 2000.
17. Simonov G.A., Sokolova T.A., Nekotorye parametry dlya kolichestvennoi otsenki stepeni vyrazhennosti elyuvial'nogo i elyuvial'no-illyuvial'nogo pochvennykh protsessov (Some parameters for a quantitative assessment of the severity of eluvial and eluvial-illuvial soil processes), *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 1981, No. 3, pp. 3–11.
18. Simonov G.A., Sokolova T.A., Nekotorye parametry dlya kolichestvennoi otsenki stepeni vyrazhennosti elyuvial'nogo i elyuvial'no-illyuvial'nogo pochvennykh protsessov (Some parameters for a quantitative assessment of

the severity of eluvial and eluvial-illuvial soil processes), *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 1982, No. 1, pp. 27–35.

19. Soldatova E.F., Sukhostepnye pochvy s differentsirovannym profilom na drevnikh korakh vyvetrivaniya Tersekskogo plato (Severnyi Kazakhstan) (Dry steppe soils with a differentiated profile on ancient weathering crusts of the Tersek plateau (Northern Kazakhstan)), *Pochvovedenie*, 1989, No. 7, pp. 24–37.

20. Sokolova T.A., Razrushenie glinistyykh mineralov v model'nykh opytakh i v pochvakh: pozmozhnnye mekhanizmy, skorost', diagnostika (analiz literatury) (Destruction of clay minerals in model experiments and in soils: possible mechanisms, speed, diagnostics (analysis of the literature)), *Pochvovedenie*, 2013, No. 2, pp. 201–218.

21. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I., *Glinistye mineraly v pochvakh* (Clay minerals in soils), Tula, 2005, 336 p.

22. Travnikova L.S., Mineralogicheskii sostav fraktsii <1 m nekotorykh solontsov chernozemnoi i kashtanovoi zon (Mineralogical composition of the fraction <1 m of some solonchets in the chernozem and chestnut zones), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1968, Vol. 2, pp. 52–60.

23. Travnikova L.S., O stroenii i strukture osnovnogo komponenta glinistogo materiala sodovykh solontsov (On the structure and structure of the main component of the clay material of soda solonchets), *Dokl. AN SSSR*, 1976, No. 6, pp. 1425–1428.

24. Travnikova L.S., O geografii i genezise glinistogo materiala solontsovykh pochv (On the geography and genesis of clayey material of solonchets soils), *Tez. dokl. 5-go s'ezda VOP*, 1977, Vol. 1, Minsk, pp. 156–157.

25. Travnikova L.S., Myasnikov V.V., Osobennosti profilya glinistogo materiala pochv solontsovogo profilya limana B. Tsaryn (Peculiarities of the profile of clay material of soils in the solonchets profile of the B. Tsaryn estuary), *Pochvovedenie*, 1967, No. 10, pp. 127–137.

26. Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie (Sediment runoff, its study and geographical distribution), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 240 p.

27. Khalcheva T.A., *Stepen' vyvetroelosti i usloviya formirovaniya raznovozrastnykh lessovykh gorizontov Russkoi ravniny: Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk* (The degree of weathering and conditions for the formation of uneven-aged loess horizons of the Russian Plain: Extended abstract of Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 1974, 31 p.

28. Chepalyga A.L., Pirogov A.N., Vliyanie vod Khvalynskogo basseina drevnego Kaspiya na formirovanie doliny Manycha i ego landshaftov (The influence of the waters of the Khvalynsky basin of the ancient Caspian Sea on the formation of the Manych valley and its landscapes), In: *Rol' osobo*

okhranyaemykh prirodnnykh territorii v sokhranении bioraznoobraziya (The role of specially protected natural areas in the conservation of biodiversity), Rostov-na-Donu: Izd-vo Rost. un-ta, 2006, pp. 409–415.

29. Chizhikova N.P., Gradusov B.P., Travnikova L.S., Osobennosti profilei glinistogo materiala pochv Barabinskoi lesostepi v svyazi s ikh evolyutsiei (Peculiarities of profiles of clay material in soils of the Baraba forest-steppe in connection with their evolution), *Nauch. dokl. vyssh. shk. biol. nauk.*, 1973, No. 8, pp. 99–106.

30. Chizhikova N.P., Khitrov N.B., Samsonova A.A., Varlamov E.B., Churilin N.A., Rogovneva L.V., Cheverdin Yu.I., Mineraly trekhkomponentnoi pyatnistosti agrochernozemov Kamennoi Stepі (Minerals of three-component patchiness of agrochernozems of the Kamennaya Steppe), *Pochvovedenie*, 2017, No. 4, pp. 468–482.

31. Bar-On P., Shainberg J., Hydrolysis and decomposition of Na/montmorillonite in distilled water, *Soil Science*, 1970, Vol. 109, No. 4, pp. 241–246.

32. Biscaye R.E., Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent Seas and Oceans, *Geological Soc. Am. Bull.*, 1965, Vol. 76, No. 7, pp. 803–832.

33. Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zemmels I., Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-ray Mineralogy Laboratory, Deep Sea Drilling Project, University of California, Riverside, In: *Init. Repts.*, Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1975, pp. 999–1007.

34. Egli M., Fitze P., Formulation of pedologic mass balance based immobile elements: a revision, *Soil Science*, 2000, Vol. 165, No. 5, pp. 437–443.

35. Kamil J., Sheinberg I., Hydrolysis of sodium montmorillonite in sodium chlorite solutions, *Soil Science*, 1968, Vol. 106, No. 3, pp. 193–199.

36. Chou L., Wollast R., Steady-state kinetics and dissolution mechanisms of albite, *American Journal of Science*, 1985, Vol. 285, pp. 963–993.

37. Smeck N.E., Wilding L.P., Quantitative evaluation of pedon formation in calcareous glacial deposits in Ohio, *Geoderma*, 1980, Vol. 24, Iss. 1, pp. 1–16.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-208-225



Ссылки для цитирования:

Соколова Т.А. Роль биоты в создании почвенного профиля и функционировании почвы: новые материалы и интерпретация известных фактов и существующих концепций // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 208-225. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-208-225

Cite this article as:

Sokolova T.A., The role of biota in soil profile formation and soil functioning: new materials and interpretation of well-known facts and existing concepts, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 208-225, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-208-225

Роль биоты в создании почвенного профиля и функционировании почвы: новые материалы и интерпретация известных фактов и существующих концепций*

© 2020 г. Т. А. Соколова

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, I,
e-mail: sokolt65@mail.ru.*

Поступила в редакцию 12.12.2020, принята к публикации 17.12.2020

Резюме: Рецензия на монографию А.Д. Фокина и С.П. Торшина “Растения в жизни почв и наземных экосистем. Нетрадиционные подходы и решения в поведении биологически значимых элементов”, опубликованную в 2020 г. издательством Lap Lambert Academic Publishing, ISBN 978-620-2-53005-7. В монографии А.Д. Фокина и С.П. Торшина читатель находит оригинальные и не всегда традиционные

**Фокин А.Д., Торшин С.П.* Растения в жизни почв и наземных экосистем. Нетрадиционные подходы и решения в поведении биологически значимых элементов. Lap Lambert Academic Publishing, 2020. 192 с. ISBN 978-620-2-53005-7. Рецензия на монографию.

для почвоведов постановку и обсуждение ряда фундаментальных проблем образования почвенного профиля и современного функционирования почвы, и роли растений и микроорганизмов в этих процессах. Авторы монографии заставляют задумываться над справедливостью некоторых общепринятых концепций и представлений, особенно касающихся транспортных потоков вещества в почвах и их моделирования. Обращено внимание на обычно недооцениваемую роль восходящих потоков вещества по проводящим системам растений и на локализацию в почвах живых корней и органических остатков. Последний фактор играет большую роль в появлении внутригоризонтной дифференциации вещества и в корневом питании растений. Большим достоинством книги является ее насыщенность экспериментальным материалом, полученным с использованием разработанных авторами уникальных методик, простых и эффективных, не имеющих аналогов в мировой литературе. С использованием этих методик удалось, в частности, определить время жизни агрегата в дерново-подзолистых почвах и установить закономерности корневого поглощения радионуклидов с поверхности и из внутренней части структурных отдельностей. В заключении сформулирован общий вывод о том, что в процессе современного функционирования почвы почвенно-профильное перераспределение вещества осуществляется преимущественно в рамках биологического круговорота. Многие из обсуждаемых в монографии проблем далеко выходят за рамки почвоведения, поэтому книга будет интересна для широкого круга специалистов, работающих в различных областях знаний – экологии, наук о Земле, физиологии растений, сельского и лесного хозяйства.

Ключевые слова: переагрегирование почвы, время жизни агрегата, подзолообразовательный процесс, дерново-подзолистые почвы, серые лесные почвы, радиоактивное загрязнение, изотопно-индикаторный метод, биологический круговорот, внутригоризонтная дифференциация вещества, корневое питание растений, листовое поглощение радионуклидов, радиография, восходящий поток веществ по проводящим системам растений.

The role of biota in soil profile formation and soil functioning: new materials and interpretation of well-known facts and existing concepts*

T. A. Sokolova

*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
e-mail: sokolt65@mail.ru.*

Received 12.12.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: Review of the monograph by A.D. Fokin and S.P. Torshin “Plants in the Life of Soils and Terrestrial Ecosystems. Nontraditional Approaches and Solutions on the Behavior of Biologically Significant Elements” published in 2020 by Lap Lambert Academic Publishing, ISBN 978-620-2-53005-7. In the monograph by A.D. Fokin and S.P. Torshin, the reader finds an original and not always traditional for soil scientists, consideration and discussion of a number of fundamental problems of the development of a soil profile and modern soil functioning and of the role of plants and microorganisms in these processes. The authors of the monograph make us think about the validity of some generally accepted concepts and hypothesis, especially those concerning transport flows of matter in soils and their modeling. Attention is drawn to the usually underestimated role of the uplifting – ascending fluxes of matter along the conductive systems of plants, and to the localization of living roots and organic residues in soils. The latter factor plays an important role in the development of intrahorizontal differentiation of the soil material and in the root nutrition of plants. The great advantage of the book is the availability of abundant experimental material obtained by unique methods developed by the authors, simple and effective, which have no analogues in the world literature. Application of these methods, allows, in particular, determining the lifetime of the aggregate in soddy-podzolic soils and establishing the trends in the root uptake of radionuclides from the surface and from the inner part of peds. In the end a general conclusion is formulated that in the course of modern soil functioning, the soil-profile redistribution of matter is performed mainly within the limits of the biological cycle of elements. Many of the problems and ideas discussed in the monograph go far beyond the soil science, therefore

*Fokin A.D., Torshin S.P., Plants in the Life of Soils and Terrestrial Ecosystems. Nontraditional Approaches and Solutions on the Behavior of Biologically Significant Elements, Lap Lambert Academic Publishing, 2020, 192 p., ISBN 978-620-2-53005-7. Review of the monograph.

the book is of great interest for a wide range of specialists in environmental and plant sciences, in agricultural chemistry, forestry and in various branches of geosciences.

Keywords: soil reaggregation, ped lifetime, podzolization, soddy-podzolic soils, gray forest soils, radioactive pollution, isotope indicator method, biological cycle, intrahorizontal differentiation of matter, root nutrition of plants, leaf absorption of radionuclides, radiography, uplifting.

В работах основателей генетического почвоведения всегда отмечалась первостепенная роль биологического фактора в формировании почвенного профиля и в функционировании почвы. Докучаев рассматривал живое вещество как один из факторов почвообразования ([1949](#), [1950a](#), [1950b](#)). Роде ([1958](#)) писал о том, что участие высших растений в процессе почвообразования осуществляется через взаимодействие почвы с корневыми системами растений и через отдачу на поверхность почвы и в ее толщу отмирающих остатков. Глазовская и Геннадиев ([1995](#)) рассматривали биологический фактор как единственный из всех факторов почвообразования, который играет ключевую роль во всех трех главных аспектах почвообразования – энергетическом, материальном и функциональном. Таргульян ([1989](#), [1996](#)) в качестве важнейшей отличительной особенности педосферы как биокосной системы называет ее способность накапливать твердофазные продукты функционирования – результат воздействия биоты на минеральные компоненты породы. По мнению Аристовской ([1980](#)), процесс разложения минералов в почвах под влиянием микроорганизмов по своему значению для биосферы может быть поставлен в ряд с такими важнейшими процессами, как ассимиляция CO_2 зелеными растениями и фиксация атмосферного N представителями почвенной микрофлоры. По словам В.И. Вернадского “...на земной поверхности нет химической силы, более постоянно действующей, а поэтому и более могущественной по своим конечным последствиям, чем живые организмы...” (1990).

В рецензируемой монографии А.Д. Фокина и С.П. Торшина читатель находит не только развитие и дополнение этих фундаментальных идей, но и принципиально новый взгляд на ряд про-

цессов, которые осуществляются в почвах при непосредственном участии высших растений и микробного сообщества.

Во введении справедливо отмечено, что достаточно полное и глубокое понимание роли биоты в процессах почвообразования может быть достигнуто только в рамках междисциплинарных исследований, осуществляемых редко.

Первая глава монографии, основанная на обобщении литературных данных и на оригинальном экспериментальном материале авторов, называется “Растения и формирование транспортных потоков вещества в почвах и наземных экосистемах”. Сама по себе такая постановка проблемы не совсем традиционна. Существуют фундаментальные работы по потокам влаги и миграции отдельных соединений в почвах и ландшафтах, но в большинстве работ отсутствует количественная оценка роли именно растений в перераспределении вещества, как по почвенному профилю, так и в экосистемах в целом. Содержание первой главы в какой-то мере восполняет этот пробел. При этом главная мысль формулируется следующим образом. *“Основные транспортные потоки доступных для поглощения растениями веществ, приводящие к их вертикальному перемещению и перераспределению по почвенному профилю, происходят в рамках биологического круговорота по проводящим системам живых растений. Абиотические транспортные потоки перемещения растворенных веществ через поровое пространство почвы имеет подчиненное значение”*.

В пользу этой точки зрения приведены следующие доводы: (1) транспортные проводящие системы растений охватывают по вертикали значительно большее пространство, чем почвенный профиль; (2) скорости перемещения веществ по проводящим системам растений на порядки превосходят скорости перемещения через поровое пространство почв, причем вещества могут одновременно передвигаться по растению в разных направлениях и независимо от общего транспортного потока влаги; (3) преимущество перемещения вещества в составе живых растений подтверждается сравнением масштабов ежегодного вовлечения отдельных элементов в биологический круговорот с масштабами перемещения вещества с абиотическими потоками.

Справедливость первых двух положений сомнений не вы-

зывают, хотя почвоведрами и не всегда осознается. В пользу третьего положения приведена таблица 1.2, в которой сопоставляется количество N, K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Si, Zn и Ni, рассчитанное в кг/га/год, ежегодно вовлекаемых в биологический круговорот и необратимо выносимых из профиля с током почвенных растворов. Таблица составлена на основании анализа многочисленных литературных источников и убедительно показывает, что первая величина превосходит вторую в разы или даже на порядок величин и более. Вместе с тем сравнение этих данных может быть не вполне однозначным.

Абиотический вынос – это скорость необратимой потери элементов, которую можно умножить на время существования почвы и приблизительно рассчитать, какое количество данного элемента должно было потеряться из почвенного профиля за этот период (см. ниже по тексту). Для биотического выноса такой расчет имеет несколько иной смысл (хотя формально размерности те же самые – кг/га/год), т. к. значительная часть элементов, вовлекаемых в биологический круговорот, уже в нем участвовала, а не “заново” усваивалась из почвы. Для того, чтобы сделать эти величины более сравнимыми, вероятно, нужно было бы рассматривать не поглощение элемента растениями, а количество элемента в чистом приросте. Оно, как показывают данные Родина и Базилевич (1965), для большинства элементов, кроме N, меньше в разы, на порядок или на несколько порядков. С этой точки зрения таблица 1.2 полезна и информативна для оценки миграции и потоков химических элементов в почве в настоящий момент, т. е. для понимания текущего функционирования экосистемы, но не для оценки “биотической” и “абиотической” потери элементов из элювиальных горизонтов.

В первой главе внимание читателя привлекается также к некоторым несоответствиям существующих теорий образования текстурно-дифференцированных подзолистых почв экспериментальным данным. В частности, масштабы абсолютной потери большинства химических элементов из элювиальной толщи не соответствуют их накоплению в иллювиальных горизонтах. Приводятся также данные авторов о выносе Fe из разных горизонтов подзолистой почвы, который в разные годы снижается от 35–70

мг/м² в год из подстилки до 10–20 мг/м² из горизонта A2B. Это значит, что из каждого горизонта в нижележащий вымывается все меньше и меньше Fe. Авторы считают, что такая закономерность проявляется и в отношении других химических элементов.

Полностью разделяя мнение авторов о том, что имеются противоречия между существующими теориями образования подзолистых почв и рядом экспериментальных данных, следует отметить и ряд веских аргументов в пользу теории подзолообразования, в ходе которого осуществляется разрушение и глинистых, и неглинистых минералов с последующим выносом продуктов разрушения (Роде, 1937). Так, Тонконогов (1999) и Тонконогов и Беркгаут (1984) сопоставили величину абсолютной потери Si из профиля подзолистой почвы, полученную по результатам балансовых расчетов, с величиной выноса Si, полученной с учетом его средней современной концентрации в лизиметрических водах, количеством влаги, просачивающейся через единицу площади, и временем существования почвы. Оказалось, что в обоих случаях потери Si из почвенного профиля вполне соизмеримы. Вывод авторов монографии о постепенном снижении с глубиной концентрации химических элементов в почвенных растворах из подзолистых почв не всегда подтверждается в отношении Si, Ca, Mn и Na.

Во второй главе дается сравнительный анализ корневого поглощения элементов питания из растительных остатков и из других источников, таких как содержащиеся в почве минералы, органо-минеральные соединения, минеральные удобрения. Получение информации об использовании растениями элементов питания из разных источников стало возможным благодаря применению изотопно-индикаторного метода. Применение разработанной авторами изотопно-обменной методики в условиях модельных опытов позволило установить, что P, Ca, Zn, Sr и Cs поглощаются различными культурами из растительных остатков в значительно большей степени, чем из природных изотопно-обменных форм и из модельных продуктов взаимодействия водорастворимых соединений этих элементов с почвой.

Преимущественное поглощение элементов питания из растительных остатков находит во второй главе убедительное объяснение и экспериментальное подтверждение. Это явление связано с

локализацией в почве живых корней именно в растительных остатках, которые, как правило, образуют скопления в виде микрон, не образуя с остальной частью почвы однородную смесь. Локализация живых корней в растительных остатках подтверждается очень наглядным модельным вегетационным опытом. В микроразонах скопления растительных остатков создаются наиболее благоприятные условия функционирования корней живых растений в отношении водно-воздушного режима и доступности, а также более полного набора элементов питания. Повышенная доступность элементов питания определяется меньшей прочностью их сорбции по сравнению с сорбцией на минеральной фазе.

Таким образом, обосновывается и экспериментально подтверждается не всегда осознаваемая почвоведомы мысль о том, что роль растений очень велика в создании гетерогенности почвенного пространства с дифференциацией как на горизонтном уровне, так и внутри горизонтов. При этом дифференциация отчетливо проявляется не только морфологически, но и функционально – в отношении корневого питания растений.

Сделан оригинальный, хотя и не вполне бесспорный вывод о том, что в биологическом круговороте *“...трофическое звено “почва-растение” почти не выходит за рамки живого растения и разновозрастных растительных остатков, распределенных в почвенном профиле”*, и что *“...минеральная основа почвы, а также система минерально-гумусовых соединений, в зрелых сформированных естественных почвах лишь незначительно участвует в процессах, составляющих биологический круговорот”*. Неоднозначность этого вывода может проявляться, в частности, в отношении калия. Доступность этого элемента из растительных остатков действительно выше, чем из минеральных источников, но в то же время процессы мобилизации, миграции и иммобилизации калия контролируются содержанием и составом глинистых минералов.

Известно, что при превышении определенной концентрации калия в растворе начинается процесс необменного поглощения (фиксации) калия лабильными 2 : 1 минералами, и этот процесс сопровождается иллитизацией – образованием иллитоподобных минералов в составе тонких фракций. При снижении концентра-

ции калия в растворе происходит потеря не только обменного, но и необменного калия, и трансформационные изменения идут по пути смектитизации и вермикулитизации слюд и иллитоподобных структур. Эти противоположно направленные процессы могут сменять друг друга в годовом цикле, что подтверждают прямые наблюдения Турпо с соавторами за составом почвенных растворов и глинистых минералов в лесных почвах ([Turpault et al., 2008](#)).

А.Д. Фокин и С.П. Торшин справедливо отмечают, что в агроценозах природная внутригоризонтная дифференциация почвы нарушается, а условия корневого питания растений ухудшаются при использовании традиционных технологий, приводящих к гомогенизации пахотного горизонта. В модельном эксперименте с ^{32}P наглядно показано, что эффективность использования фосфора ячменем из растительных остатков в 1.5 раза выше, чем из минеральных удобрений. Эти данные соответствуют хорошо известному положению о роли органических удобрений в повышении плодородия почв.

Вместе с тем в условиях химических и радиоактивных загрязнений повышенное потребление элементов питания из органических остатков может приводить к негативному эффекту, увеличивая поступление токсикантов в биологический круговорот, и к загрязнению сельскохозяйственной продукции, что не всегда учитывается при решении экологических проблем.

Рассматривая роль растительного покрова на территориях, загрязненных радионуклидами, авторы привлекают внимание к недостаточно оцененной возможности поступления радионуклидов в растения за счет листового поглощения, чему способствуют следующие факторы. (1) Высокий уровень проективного покрытия, достигающий практически 100% в тундровой, таежной и степной зонах в природных условиях и почти 100% в агроценозах на определенных стадиях развития. (2) Высокая растворимость в воде многих исходных соединений радионуклидов. (3) Ничтожные концентрации радионуклидов в атмосферных осадках. В случае выпадения растворимых радионуклидов два последних фактора приводят к их быстрой и полной сорбции на листовой поверхности. (4) Быстрое проникновение радионуклидов с поверхности

листьев с последующим перераспределением по органам растений. Эти закономерности относятся к ^{137}Cs и в меньшей степени к ^{90}Sr .

Поступление поглощенных листовой поверхностью радионуклидов в корни приводит к их перераспределению в почве и увеличивает таким образом количество радионуклидов, вовлекаемых в биологический круговорот и в трофические цепи. Анализ существующей информации показывает, что это количество и, соответственно, уровень радиоактивного загрязнения биологической продукции значительно выше в природных экосистемах по сравнению с агроценозами.

В третьей главе, которая называется “Роль растений в микробиологической мобилизации элементов минерального питания”, сама постановка проблемы является не вполне традиционной для почвоведения и требует междисциплинарных исследований совместно со специалистами в области почвоведения, физиологии растений и почвенной микробиологии. Известно, что необходимым условием устойчивого функционирования почв и наземных экосистем является тесное трофическое взаимодействие зеленых растений, продуцирующих первичную биомассу, и микроорганизмов, использующих эту биомассу и способных переводить элементы питания из малодоступных минеральных соединений в формы, которые могут усваиваться и самими микроорганизмами, и растениями.

Исходя из этих представлений, А.Д. Фокин и С.П. Торшин предлагают следующее функциональное определение почвы: *“...это поверхностный слой земной коры, в котором реализуется устойчивое длительное функционирование и биопродуцирование, как функция совмещенной жизнедеятельности высших растений и автотрофных микроорганизмов”*. Это определение не противоречит классическому определению почвы В.В. Докучаева, но отражает только один из аспектов этой сложной природной системы, а именно аспект функциональный.

Авторы отмечают большие достижения последних десятилетий в изучении способности определенных бактерий фиксировать молекулярный азот из воздуха и недостаточную изученность механизмов микробиологической мобилизации элементов пита-

ния из литологических источников. С последним утверждением трудно согласиться. За последние 30–40 лет в мировой литературе опубликовано много экспериментальных работ, в которых рассматривалось изменение разных минералов под влиянием функционирования отдельных родов грибов, бактерий и высших растений и под совместным воздействием высших растений и представителей микробного сообщества.

Приведены результаты проведенного авторами модельного опыта по динамике освобождения из гранита и базальта К, Са, Fe и Mn в процессе инкубирования с добавлением глюкозы и целлолигнина как источников органического вещества. Установлено, что в присутствии медленно разлагающегося целлолигнина освобождение этих металлов происходило в течение более длительного времени, чем в вариантах опыта с быстро разлагающейся глюкозой.

В третьей главе приведены результаты оригинального динамического эксперимента авторов, в котором сопоставлялись скорость образования подвижных фосфатов и микробиологического превращения добавленного органического вещества (глюкозы) на образцах дерново-подзолистой почвы под клевером и под паром. Установлено, что оба процесса происходят сопряженно, и что содержание мобильных фосфатов, накопленных в результате разложения органического вещества, остается относительно устойчивым только в почвах с высоким уровнем гумусированности.

Четвертая глава “Дифференциация почвенной массы на агрегатном уровне и корневое поглощение биологически значимых элементов” построена на результатах оригинальных и в ряде случаев – уникальных экспериментов авторов, проведенных по разработанным им методикам. Сама по себе постановка проблемы дифференциации почвы на агрегатном уровне не является новой – различия в составе между поверхностью и внутренней частью агрегата отмечали Геммерлинг (1922), Вильямс (1935), Таргульян (1974), Brewer (1964) и многие другие исследователи. Но в последние десятилетия изучение этого вопроса стало особенно актуальным в связи с усиливающимся загрязнением биосферы аэральными поллютантами, поскольку их первичное взаимодействие с

почвой происходит преимущественно именно с поверхностями агрегатов. Продолжительность этого взаимодействия зависит от химического сродства загрязняющего вещества с компонентами твердой фазы и с временем жизни агрегата, которое авторы называют “временем переагрегирования”. Дифференциация распределения токсикантов на агрегатном уровне не может не влиять на их корневое поглощение.

При изучении дифференциации ^{137}Cs на агрегатном уровне авторы разработали несколько уникальных методик, достаточно эффективных и вместе с тем простых и незатратных.

Результаты одного из экспериментов с промывкой монолитов наглядно показывают, что глубина проникновения ^{137}Cs в дезагрегированной почве в разы меньше, чем в почве с естественным сложением, где миграция осуществляется по трещинам и в межагрегатном пространстве. Использование метода радиографии полностью подтвердило аккумуляцию радионуклида в поверхностном слое крупных агрегатов, а также на поверхности более мелких структурных отдельностей, слагающих крупные агрегаты. При этом удельная активность в поверхностных слоях снижается от поверхности вглубь агрегата. Толщина слоя с повышенной активностью составляет ~ 1 мм, но с учетом неправильной формы поверхности эта величина может быть на порядок меньше. По результатам другого опыта установлено увеличение активности по мере уменьшения размера агрегата.

Изучение образцов дерново-подзолистой почвы и оподзоленного чернозема, взятых через 14 лет после аварии на Чернобыльской АЭС, показало почти полное отсутствие дифференциации ^{137}Cs на агрегатном уровне за счет переагрегирования и диффузии.

Предложены понятие и термин “коэффициент концентрирования”, как отношение активности в данном компоненте (агрегаты определенного размера, корневые остатки, поверхность агрегата и др.) к средневзвешенной удельной активности почвенного слоя или горизонта, содержащего этот компонент.

Авторами разработан не имеющий аналогов способ количественной оценки корневого поглощения ^{90}Sr и ^{137}Cs отдельно с поверхности и из внутренней части педов с использованием изо-

топно-индикаторного метода. Для этого готовили агрегаты разного размера с однородным распределением радионуклида, с его локализацией на поверхности агрегата в его внутренней части. Агрегаты смешивали примерно в тех пропорциях, в которых они присутствовали в исходных почвах (темно-серой и дерново-подзолистой), и на этом материале выращивали горох, фасоль и бобы. Установлено, что растения потребляли в разы больше ^{137}Cs при его внесении на поверхность агрегата, чем при его равномерном распределении в пределах педа. Для ^{90}Sr различия были меньше, но закономерность сохранялась.

При повторном выращивании культур на том же материале с течением времени поступление ^{137}Cs в растения при его внесении на поверхность агрегатов сильно уменьшалось, что можно объяснить процессами переагрегации почвы и сорбцией радионуклида на твердой фазе. При равномерном исходном распределении ^{137}Cs в пределах агрегата это уменьшение тоже наблюдалось, но в значительно меньшей степени, поскольку оно было связано только с процессами сорбции.

Авторы разработали также не имеющий аналогов методический подход к определению скорости переагрегации и времени жизни агрегата, основанный на изменении самопоглощения мягкого β -излучения ^{137}Cs с энергией <0.6 МэВ и пробегом <1 мм. Этот метод, детально описанный в главе 4, позволяет регистрировать уменьшение количества ^{137}Cs в поверхностном слое за счет переагрегирования почвенной массы. Этот метод был опробован в условиях полевого опыта, в котором контейнеры с агрегатами с поверхностным внесением ^{137}Cs помещались в почву под паром и под естественной растительностью на разные глубины, причем конструкция контейнеров обеспечивала возможность развития корней и свободное передвижение влаги.

По результатам эксперимента был сделан расчет среднестатистического времени жизни агрегатов, которое в почве под естественной растительностью оказалось равным 1.4–2 годам и 2.5–9 годам на глубинах 10 и 30 см соответственно. В почве под паром эти величины варьируют в пределах 1.4–3 года и 2–12 лет. Достоверность и статистическая обоснованность экспериментально полученного авторами времени жизни агрегатов, которое укладыва-

ется в первое десятилетие, сомнения не вызывают, но при этом может возникнуть вопрос о продолжительности жизни агрегатов в более глубоких горизонтах. Известно, что в подзолистых почвах на покровных суглинках, начиная с горизонта BEL, в трещинах и порах формируется хорошо выраженный морфологически достаточно сложный кутанный комплекс, часто многослойный (Бронникова, Таргульян, 2005), который едва ли подвергается переагрегированию каждые несколько лет или даже десятилетий.

Метод, основанный на использовании β -излучения ^{137}Cs , был применен также для изучения переагрегирования почвенной массы и деструкции поверхностно меченых агрегатов в условиях вегетационного опыта. Для этого в одних и тех же сосудах последовательно в 4 цикла выращивали фасоль и горох, причем в одной серии опытов после каждой стадии почву извлекали из сосудов и заново помещали в сосуд, а во второй – сохраняли исходное сложение. В первом случае разрушение исходных агрегатов достигло 100% уже на третьем цикле, а во втором – только на четвертом и не во всех повторностях опыта. В отдельном эксперименте, где деструкция агрегатов обеспечивалась процессами промерзания-оттаивания без участия корней растений, процент неразрушенных агрегатов был больше, и они сохранялись в течение более продолжительного времени.

В целом рассмотренный в четвертой главе материал, посвященный проблемам переагрегации почвенной массы, времени жизни агрегатов и преимущественному корневому поглощению радионуклидов с поверхности агрегатов полностью основан на методиках, разработанных авторами, и не имеет аналогов в мировой литературе.

В заключении монографии сформулирован общий вывод о том, что в процессе современного функционирования почвы почвенно-профильное перераспределение вещества осуществляется преимущественно в рамках биологического круговорота.

Намечены основные направления дальнейших исследований, необходимых для получения полной картины транспортных потоков вещества в почвах и ландшафтах. Они должны включать количественную оценку следующих показателей: корневого поглощения из отдельных генетических горизонтов почвы; поступ-

ления веществ с наземным и корневым опадом в отдельные горизонты почв; поступления вещества с прижизненными выделениями корнями и наземными органами растений; объемов и скоростей восходящих и нисходящих потоков веществ по проводящим корням растений; доли участия различных компонентов почвы в корневом питании растений. Необходимо также глубокое изучение поглощения растениями элементов питания из растительных остатков и из минеральных компонентов почвы.

Монография А.Д. Фокина и С.П. Торшина безусловно интересна. Читатель находит в ней оригинальную и не всегда традиционную для почвоведов постановку и обсуждение ряда фундаментальных проблем образования почвенного профиля и современного функционирования почвы. Авторы монографии заставляют задумываться над справедливостью некоторых общепринятых концепций и представлений, особенно касающихся транспортных потоков вещества в почвах и их моделирования.

Большим достоинством книги является ее насыщенность экспериментальным материалом авторов, полученным с использованием разработанных авторами уникальных методик. Этот материал и эти эффективные методики не имеют аналогов в мировой литературе.

Многие из обсуждаемых в монографии проблем далеко выходят за рамки почвоведения, поэтому книга будет интересна для широкого круга специалистов – физиологов растений, агрохимиков, экологов, геохимиков, лесоводов и представителей других специальностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аристовская Т.В.* Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука. 1980. 187 с.
2. *Бронникова М.А., Таргульян В.О.* Кутанный комплекс текстурно-дифференцированных почв. М.: Академкнига, 2005. 197 с.
3. *Вильямс В.Р.* Прочность и связность структуры почвы // Почвоведение. 1935. № 5–6. С. 23–35.
4. *Геммерлинг В.В.* Некоторые данные для характеристики подзолистых почв // Русский почвовед. 1922. № 4–5. С. 20–27.
5. *Глазовская М.А., Геннадиев А.Н.* География почв с основами почвоведения. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 1995. С. 24–91.

6. Докучаев В.В. Происхождение растительно-наземных почв вообще и русского чернозема в частности // Русский чернозем. Сочинения. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. III. С. 404–439.
7. Докучаев В.В. Главные моменты в истории оценок земель Европейской России // Сочинения. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1950а. Т. IV. С. 13–254.
8. Докучаев В.В. Естественноисторическая классификация русских почв // Сочинения. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1950б. Т. IV. С. 255–286.
9. Роде А.А. Подзолообразовательный процесс. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 454 с.
10. Роде А.А. Факторы почвообразования и почвообразовательный процесс // Почвоведение. 1958. № 9. С. 29–38.
11. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности. М.–Л.: Наука, 1965. 253 с.
12. Таргульян В.О., Соколова Т.А., Куликов А.В. Организация, состав и генезис дерново-палево-подзолистой почвы на покровном суглинке. Аналитическое исследование. М., 1974. 110 с.
13. Таргульян В.О., Соколова Т.А. Почва как биокосная природная система: “реактор”, “память”, и регулятор биосферных взаимодействий // Почвоведение. 1996. № 1. С. 34–47.
14. Таргульян В.О., Фокин А.Д., Соколова Т.А., Шоба С.А. Экспериментальные исследования педогенеза: возможности, ограничения, перспективы // Почвоведение. 1989. № 1. С. 15–23.
15. Тонконозов В.Д. Глинисто-дифференцированные почвы Европейской России. М., 1999. 156 с.
16. Тонконозов В.Д., Беркгаут В.В. Опыт применения массовых аналитических данных в изучении генезиса текстурно-дифференцированных почв европейской части СССР // Почвоведение. 1984. № 9. С. 108–116.
17. Brewer R. Fabric and Mineral Analysis of Soils / Robert. E. Krieger (Ed.). New York, 1975. 482 p.
18. Turpault M.P., Righi D., Ute'rano C. Clay minerals: precise markers of the spatial and temporal variability of the biogeochemical soil environment // Geoderma. 2008. Vol. 147. Iss. 3–4. P. 108–115.

REFERENCES

1. Aristovskaya T.V., *Mikrobiologiya protsessov pochvoobrazovaniya* (Microbiology of soil formation processes), Leningrad: Nauka, 1980, 187 p.
2. Bronnikova M.A., Targul'yan V.O., *Kutannyi kompleks teksturno-differentsirovannykh pochv* (Kutan complex of texturally differentiated soils), Moscow: Akademkniga, 2005, 197 p.
3. Vil'yams V.R., Prochnost' i svyaznost' struktury pochvy (Strength and cohesion of soil structure), *Pochvovedenie*, 1935, No. 5–6, pp. 23–35.
4. Gemmerling V.V., Nekotorye dannye dlya kharakteristiki podzolistykh pochv (Some data for characteristic of podzol soils), *Russkii pochvoved*, 1922, No. 4–5, pp. 20–27.
5. Glazovskaya M.A., Gennadiev A.N., *Geografiya pochv s osnovami pochvovedeniya* (Geography of soils with basics of soil science), Moscow: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1995, pp. 24–91.
6. Dokuchaev V.V., Proiskhozhdenie rastitel'no-nazemnykh pochv voobshche i russkogo chernozema v chastnosti (Origin of plant-soils in general and Russian chernozem in particular), In: *Russkii chernozem. Sochineniya* (Russian chernozem. Works), Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1949, Vol. III, pp. 404–439.
7. Dokuchaev V.V., Glavnye momenty v istorii otsenok zemel' Evropeiskoi Rossii (The main moments in the history of assessments of the lands of European Russia), In: *Sochineniya* (Works), Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1950a, Vol. IV, pp. 13–254.
8. Dokuchaev V.V., Estestvennoistoricheskaya klassifikatsiya russkikh pochv (Natural-historical classification of Russian soils), In: *Sochineniya* (Works), Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1950b, Vol. IV, pp. 255–286.
9. Rode A.A., *Podzoloobrazovatel'nyi protsess* (Podzol formation process), Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1937, 454 p.
10. Rode A.A., Faktory pochvoobrazovaniya i pochvoobrazovatel'nyi protsess (Factors of soil formation and soil formation process), *Pochvovedenie*, 1958, No. 9, pp. 29–38.
11. Rodin L.E., Bazilevich N.I., *Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskii krugovorot v osnovnykh tipakh rastitel'nosti* (Dynamics of organic matter and biological circulation in the main types of vegetation), Moscow–Leningrad: Nauka, 1965, 253 p.
12. Targul'yan V.O., Sokolova T.A., Kulikov A.V., *Organizatsiya, sostav i genezis dernovo-palevo-podzolistoi pochvy na pokrovnom suglinke. Analiticheskoe issledovanie* (Organization, composition and genesis of soddy-pale-podzolic soil on cover loam. Analytical research), Moscow, 1974, 110 p.
13. Targul'yan V.O., Sokolova T.A., *Pochva kak biokosnaya prirodnaya*

sistema: "reaktor", "pamyat'", i regulator biosfernykh vzaimodeistvii (Soil as a bioinert natural system: "reactor", "memory", and the regulator of biospheric interactions), *Pochvovedenie*, 1996, No. 1, pp. 34–47.

14. Targul'yan V.O., Fokin A.D., Sokolova T.A., Shoba S.A., Eksperimental'nye issledovaniya pedogeneza: vozmozhnosti, ogranicheniya, perspektivy (Experimental studies of pedogenesis: possibilities, limitations, prospects), *Pochvovedenie*, 1989, No. 1, pp. 15–23.

15. Tonkonogov V.D., *Glinisto-differentsirovannye pochvy Evropeiskoi Rossii* (Clay-differentiated soils of European Russia), Moscow, 1999, 156 p.

16. Tonkonogov V.D., Berkgaut V.V., Opyt primeneniya massovykh analiticheskikh dannykh v izuchenii genezisa teksturno-differentsirovannykh pochv evropeiskoi chasti SSSR (Experience in the use of mass analytical data in the study of the genesis of texture-differentiated soils of the European part of the USSR), *Pochvovedenie*, 1984, No. 9, pp. 108–116.

17. Brewer R. Robert. E. Krieger (Ed.), *Fabric and Mineral Analysis of Soils*, New York, 1975, 482 p.

18. Turpault M.P., Righi D., Ute'rano C., Clay minerals: precise markers of the spatial and temporal variability of the biogeochemical soil environment, *Geoderma*, 2008, Vol. 147, Iss. 3–4, pp. 108–115.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 105

Главный редактор *А.Л. Иванов*

Заместитель главного редактора *И.Ю. Савин*

Научный редактор выпуска *Д.Н. Козлов*

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 25.12.2020 г.
Подписано в печать 25.12.2020 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 13,2 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