

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-5-35



Ссылки для цитирования:

Каганова А.Е., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Мусаэлян Р.Э. Морфология, минералогический состав и генезис слитоземов лимана Большой (Волгоградская область) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 5-35. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-5-35

Cite this article as:

Kaganova A.E., Varlamov E.B., Churilin N.A., Musaelyan R.E., Morphology, mineralogical composition and genesis of vertisols in liman Bolshoi (Volgograd region), Dokuchaev Soil Bulletin, 2021, V. 109, pp. 5-35, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-5-35

Благодарность:

Авторы выражают признательность Хитрову Николаю Борисовичу за помощь при полевых работах, а также ценные советы при обсуждении материалов.

Acknowledgments:

The authors would like to thank Nikolai Borisovich Khitrov for his help in the fieldwork and his valuable advice in discussing the results.

Морфология, минералогический состав и генезис слитоземов лимана Большой (Волгоградская область)

© 2021 г. А. Е. Каганова*, Е. Б. Варламов,
Н. А. Чурилин, Р. Э. Мусаэлян

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

*<https://orcid.org/0000-0002-2055-214X>, e-mail: a.e.kaganova@gmail.com.

Поступила в редакцию 24.09.2021, после доработки 20.10.2021,
принята к публикации 16.12.2021

Резюме: Изучено морфологическое строение профилей двух почв микроповышений (слитозем квазиглеевый элювиированный карбонатный окисленно-глеевый и слитозем квазиглеевый сегрегационно-карбонатный окисленно-глеевый) гильгайного комплекса лимана Большой (Светлоярский район Волгоградской области).

Несмотря на одинаковое положение объектов в микрорельефе и равные относительные высоты микроповышений, выявлены морфологические различия профилей на уровне подтипа. В одном из профилей в связи с более высокой влажностью признаки слитогенеза были выражены слабее. Тогда как во втором были описаны более яркие признаки слитогенеза – сликенсаиды протяженностью 15–30 см, мелкие поверхности скольжения (до 10 см), клиновидные агрегаты. Доля илистой фракции в слитых горизонтах, полученной по методике Горбунова, составила 45–52%. Анализ качественного минералогического состава илстых фракций показал, что смектитовая фаза представлена преимущественно неупорядоченными смешанослойными смектит-иллитовыми образованиями. Индивидуальный иллит по характеру заполнения октаэдрического слоя принадлежит к биотитовой разновидности. Анализ соотношения основных минеральных фаз показал преобладание иллита (53–87%) во всех почвенных образцах. В первом разрезе отмечено увеличение доли смектитового компонента с глубиной (от 1 до 35%). Во втором разрезе закономерности распределения минеральных фаз отсутствуют (колебания в пределах 24–37%), что может быть связано с вовлечением слоев шоколадных глин в профиль в процессе почвообразования. Минералогический анализ шоколадных глин (почвообразующих пород) показал их высокую неоднородность в зависимости от глубины залегания исследуемого слоя. Корреляции между выраженностью признаков слитогенеза и долей набухающего компонента выявлено не было. Дана схема этапов формирования почвенного покрова исследованного участка лимана. Основные причины, которые привели к образованию различных почв на микроповышениях, – неравномерность “выдавливания” почвенных блоков снизу вверх в процессе формирования микрорельефа, а также локальная эрозия бугорков.

Ключевые слова: вертигенез, гильгай, набухающие минералы, смешанослойные образования, илстая фракция.

Morphology, mineralogical composition and genesis of vertisols in liman Bolshoi (Volgograd region)

© 2021 A. E. Kaganova*, E. B. Varlamov,
N. A. Churilin, R. E. Musaelyan

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-2055-214X>, e-mail: a.e.kaganova@gmail.com.

Received 24.09.2021, Revised 20.10.2021, Accepted 16.12.2021

Abstract: The morphological structure of the profiles of two vertisols on microelevations of the gilgai complex of the Bolshoi liman (Svetloyarsk district of the Volgograd region) was studied. Despite the same microrelief position and equal relative heights of microelevations, morphological differences in the profiles at the subtype level were revealed. In one of the profiles, due to the higher humidity, the signs of vertisol genesis were less pronounced. Whereas in the second, more pronounced signs of vertic processes were described – slickensides with 15–30 cm length, smaller slickensides up to 10 cm, wedge-shaped aggregates. The proportion of the clay fraction in the mixed horizons, obtained by the Gorbunov method, was 45–52%. Analysis of the qualitative mineralogical composition of the clay (<1µm) fractions showed that the smectite phase is represented mainly by disordered and mixed-layered smectite-illite formations. Individual illite belongs to the biotite variety according to the filling of the octahedral layer. Analysis of the ratio of the main mineral phases showed the predominance of illite (53–87%) in all soil samples. In the first pit an increase in the proportion of the smectite component with depth (from 1 to 35%) is noted. In the second pit, there are no regularities in the distribution of mineral phases (fluctuations within 24–37%), which may be associated with the involvement of chocolate clays layers in the profile during soil formation. Mineralogical analysis of chocolate clays (parent rocks) showed their high heterogeneity depending on the depth of the studied layer. No correlation was found between the severity of the signs of vertic processes and the proportion of the swelling component. Illustration of the stages of the formation of the soil cover on the investigated plot of the liman is given. The main reasons that led to the formation of different soils on microelevations are the unevenness of the “squeezing out” of soil blocks upward in the process of microrelief formation in combination with local erosion.

Keywords: vertic processes, gilgai, swelling minerals, mixed-layered minerals, clay fraction.

ВВЕДЕНИЕ

Слитоземы (вертисоли) – глинистые набухающие почвы с рядом специфических морфологических признаков. К ним относятся сликенсайды (“зеркала скольжения”), клиновидные агрега-

ты, и зачастую – формирование микрорельефа гильгаи. Эти свойства, а также степень их выраженности обусловлены комплексом факторов ([Хитров, 2003](#)), из которых основными являются: климатический (гидротермический режим почв), геоморфологический (перераспределение осадков) и литологический (доля смектитовой фазы, ее качественный состав и, как следствие, потенциальная способность почв к усадке/набуханию).

Долгое время слитоземы считались почвами тропических и субтропических поясов. Наибольшие площади их распространения расположены в Австралии (11.5%, по данным <https://soe.environment.gov.au>), Индии (8.52% ([Bhattacharyya et al., 2013](#))), на Африканском континенте, в южной части Североамериканского континента и на территории отдельных стран Южной Америки. Последние десятилетия представления о вертисолях были значительно расширены: обнаружены новые ареалы формирования этих почв, получены сведения о разнообразии их минералогического состава. “Центральный образ” вертисолей, а также экстремальные условия их формирования подробно рассмотрены в статье Ковды ([Kovda, 2020](#)).

Во многих публикациях указан преимущественно смектитовый (монтмориллонитовый) состав илистых фракций слитых почв. Также ранее считалось, что именно монтмориллонитовый состав обеспечивает необходимую интенсивность процессов усадки/набухания для формирования диагностических признаков вертисолей – сликенсайдов и клиновидных агрегатов. При этом Coulombe с соавторами ([1996](#)) в обзоре описывает вертисоли каолинитового состава в Австралии, Сальвадоре, Судане, на Гавайях, в Кампучии. Также известны варианты с преобладанием в составе глинистых минералов иллита, например, в смолницах (вертисолях) Болгарии ([Kabaktschiew, Muckenhausen, 1969](#)), со смешанослойным или полиминеральным составом. Пример полиминерального состава – кислые вертисоли Тринидада, в которых доля смектита соответствует процентному содержанию иллита и каолинита, таким образом не превышая 15–24% ([Ahmad, 1985](#)). Также в литературе имеются сведения, что в определенных условиях степень набухания каолинита может быть достаточна для формирования вертикальных (слитых) признаков, а также незначительного коли-

чества смектитов в почве (при количественном доминировании каолинита) может быть достаточно для появления вертиковых свойств ([Bhattacharyya et al., 1997](#)).

Таким образом, минералогический состав вертисолей других стран изучен достаточно широко и подробно, в то время как слитые и слитизированные почвы России требуют более детального исследования. В настоящий момент выделены следующие основные ареалы распространения слитых и слитизированных почв ЕТР: Северный Кавказ ([Ковда, 1992](#); [Хитров, 2003](#)), Среднее и Нижнее Поволжье ([Хитров, Роговнева, 2014](#); [Гурсина, 1973](#)), Кубано-Приазовская низменность и Тамань ([Хитров, Роговнева, 2017](#); [Хитров и др., 2015](#)), а также Центрально-Черноземный регион ([Хитров и др., 2013](#)). Наиболее северной (экстремальной) точкой обнаружения слитых почв является Забайкалье ([Kovda, 2017](#)).

Среди перечисленных ареалов распространения слитоземов наибольшее количество работ по оценке минералогического состава относится к Ставропольскому краю ([Хитров, Чижикина, 1995](#); [Хитров, 2003](#); [Жукова, 2016](#); [Ковда и др., 1992](#)). В Волгоградской области, помимо детального изучения минералогии слитых почв Волго-Ахтубинской поймы ([Корнблум, 1966](#)), дана лишь минералогическая характеристика почв нескольких лиманов ([Травникова, Мясников, 1973](#); [Пак и др., 1973](#); Корнблум, Дементьева, 1976).

Таким образом, целью работы является пополнение данных о минералогическом составе слитых почв России, в частности почв лиманов Волгоградской области. Также в задачи исследования входит оценка связи между соотношением минеральных фаз и степенью выраженности признаков слитогенеза.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в Светлоярском районе Волгоградской области. Данная территория относится к Северной Сарпинской низменной равнине ([Доскач, 1979](#)).

Исследуемые почвы располагаются в центральной части лимана Большой (координаты 48°23'37.48" N; 44°52'3.80" E), который находится на правом берегу р. Волга в 3.5 км к юго-западу от с. Райгород. Лиман имеет выраженный гильгайный микрорельеф в

виде чередования округлых микроповышений и микрозападин, соответствующий решетчатому типу ([Хитров и др., 2020](#)). Почвообразующие породы представлены шоколадными глинами ([Хитров и др., 2020](#)).

Оба изученных профиля находятся на микроповышениях на расстоянии 4 м друг от друга. Отбор образцов проводился по генетическим горизонтам. Также на одном из микроповышений бурили до почвообразующих пород, отбирая образцы каждые 10 см. Почвы классифицированы в соответствии с Полевым определителем ([2008](#)) и WRB ([2015](#)).

Количественное выделение илистых фракций (<1 мкм) проводилось методом седиментации по Горбунову ([1971](#)). В случае вскипания почвы при полевом описании образцы предварительно обрабатывались 10% HCl для удаления карбонатов с последующим отмытием от кислоты. Минералогический состав изучен рентгенодифрактометрическим методом с помощью универсального рентгенодифрактометра HZG-4a (Carl Zeiss, Jena). Режим съемки: излучение Cu, напряжение на трубке 30 кВ, сила тока 20 мА, угловая скорость движения счетчика 2θ град/мин. Расчеты произведены с применением программного обеспечения дифрактометра-авто, версия 2014, разработчик ООО “Ирис”. Съемка ориентированных препаратов из фракций, насыщенных магнием, выполнена в трех состояниях образца: а) воздушно-сухом; б) сольватированном этиленгликолем в течение 2 суток; в) после прокаливания при 550 °С в течение 2 ч. Соотношения основных минеральных фаз в илистой фракции рассчитываются по методу Бискайя ([1965](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подробное морфологическое описание исследованных разрезов приведено в таблице 1. Анализируя его можно выделить основные различия – профиль РЛ-1 характеризовался: 1) наличием элювиированного горизонта Q1el,ox; 2) большей выраженностью процесса окисления железа (признак *ox*); 3) большей глубиной промытости от карбонатов; 4) более холодными (2,5Y) тонами окраски верхней части профиля (до 37–40 см), а также большей влажностью профиля в целом.

Таблица 1. Морфологическая характеристика исследованных разрезов
Table 1. Morphological characteristics of the investigated soil pits

Горизонт	Глубина	Влажность	Цвет по Манселлу	Гран-состав	Структура	Новообразования	Вскипание от HCl	Примечания
Разрез РЛ-1 Слитозем квазиглеевый элювиированный карбонатный окисленно-глеевый Haplic Vertisol (Gilgaic, Stagnic)								
Wp _{ir}	0-3	сухой	10YR 4/2	л/с	мелкокомковатая, порошистая	–	–	Темная окраска за счет присутствия тонкодисперсных углистых остатков
Q1el _{ox}	3-7(8)	сухой	2,5Y 5/2-6/2 (фон). 2,5 YR 6/2 (пятна)	л/с	чешуйчатый	Рыжие железистые пятна	–	Элювиированный горизонт
Q2ox	7(8)-24	свежий	2,5Y 4/2 (фон), 10YR 5/6-5/8 (пятна)	л/с-с/с	призмы→ уплощенные призмы→ орешки→ зерна	Обильные рыжие диффузные пятна, много орштейнов ~ 3мм Ø	–	Выраженная многопорядковая структура

Q3ox	24-37(40)	влаж-но-ватый	2,5Y 4/2 (фон), 10YR 5/6-5/8 (пятна)	с/с	аналогична Q2ox, призмы составляют крупные блоки (до 20 см)	–	–	Очень плотный и твердый (с трудом разламывается руками)
BCsa,q	37(40)-65	влаж-но-ватый	10YR 4/3	с/с-т/с	призмовидная	–	слабое	–
BCsa, q, v, nc	65-100	влажный	10YR 4/3	т/с	призмовидная	Небольшие сликенсайды (3-5 см), редкие орштейны (4-5 мм Ø), редкие пятна карбонатов	сильное	–
BCsa,q	100-130	влажный	7,5YR 4/3	т/с	комковатая	Единичные пятна карбонатов	бурное	–

Разрез РЛ-2 Слитозем квазиглеевый сегрегационно-карбонатный окисленно-глеевый Calcic Vertisol (Gilgaic Protostagnic)								
Wca	0-1(2)	сухой	2.5Y 5/1-5/2	л/с-с/с	порошистый	–	сильное	–
Q1ca, ox	1(2)-7(8)	сухой	10YR 5/2-4/2	с/с	зернистый	Редкие мелкие железистые пятна	бурное	–
Q2ca, nc	7(8)-20	сухой	10YR 4/3-3/2	с/с	призмы→ орешки→ зерна	Обильная белоглазка (0,2-1 см Ø), железисто-марганцевые пятна и пленки	бурное	Многопорядковая структура с выраженными границами
Q3ca, nc	20-40	свежий	10YR 4/3	с/с	призмы> орешки> зерна	Обильная белоглазка (0,2-1 см Ø)	бурное	Горизонт с максимальным количеством белоглазки
Qca,nc, v	40-50	свежий	7,5YR 4/4	с/с	призматическая	Мелкие единичные сликенсайды, белоглазка	сильное	–

Q/V _{са} , пс	50-90	влаж- но- ватый	7,5YR 4/4	с/с-т/с	призматическая, клиновидные агрегаты	Крупные сликенсаиды, единичная белоглазка	сильное	–
BC _{са} , q,v	90-105	влаж- но- ватый	7,5YR 4/3	С/с	призмочидная	Мелкие сликенсаиды, мелкие Fe-Mn точки- примазки (~ 1-2 мм Ø)	сильное	–

Признаки слитогенеза выражены слабо.

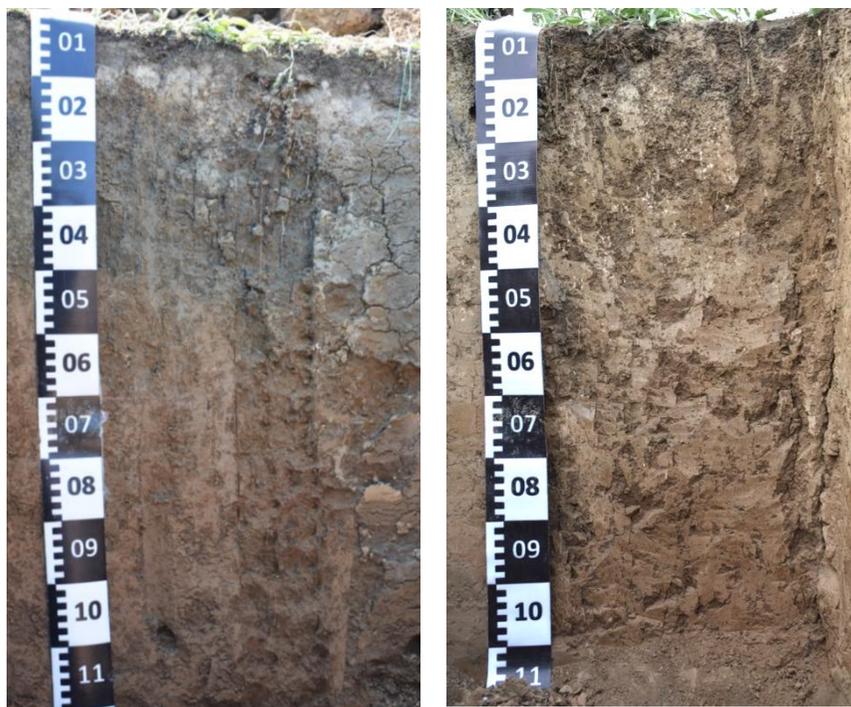
Разрез РЛ-2 (рис. 1Б) отличался: 1) бурным вскипанием всего материала с поверхности; 2) наличием обильной белоглазки; 3) наличием выраженного слитого горизонта со сликенсайдами протяженностью 15–30 см и клиновидными агрегатами на пересечениях поверхностей скольжения. Несмотря на более теплые тона окраски (7,5YR-10YR) в профиле отмечались признаки периодического переувлажнения – редкие железистые и железисто-марганцевые пятна, мелкие новообразования-примазки. При этом в целом профиль был более сухим, отмечены крупные магистральные трещины иссушения, идущие до глубины 80–100 см.

Важно отметить, что почва разреза РЛ-1 была классифицирована как слитозем, несмотря на мелкие размеры сликенсайдов. Это объясняется тем, что горизонты, в которых были описаны признаки слитогенеза имели более высокую влажность. Почва оказалась более липкой, что существенно затруднило диагностику сликенсайдов (практически невозможно их препарировать для оценки размеров).

Проведенная нивелирная съемка показала (рис. 2), что оба микроповышения находятся на равных относительных высотах.

По результатам рентгенографической съемки были выделены и рассчитаны соотношения основных минеральных фаз (смектитовая, иллитовая, а также сумма фаз хлорита и каолинита) в илистых фракциях каждого образца (табл. 2).

По распределению илистой фракции, полученной методом седиментации по Горбунову, профиль РЛ-1 характеризуется элювиально-иллювиальным распределением с максимумом в горизонте Q3ox (53%). Во втором профиле явных закономерностей не выявлено, происходит увеличение доли ила с глубиной (от 45 до 61%). При этом в срединных горизонтах профиля отмечается незначительное колебание в содержании ила. В целом профиль РЛ-2 более глинистый. Доля илистой фракции в образцах шоколадных глин сильно варьирует в зависимости от глубины отбора, что характерно для данных отложений в силу их полифазальности.



а)

б)

Рис. 1. Общий вид исследованных профилей. **а)** РЛ-1 – слитозем квазиглеевый элювируемый карбонатный окисленно-глеевый; **б)** РЛ-2 – слитозем квазиглеевый сегрегационно-карбонатный окисленно-глеевый.

Fig. 1. General view of the investigated soil pits. **a)** РЛ-1 – Haplic Vertisol (Gilgaic, Stagnic); **б)** РЛ-2 – Calcic Vertisol (Gilgaic Protostagnic).

Таблица 2. Соотношение основных минеральных фаз в илистых фракциях исследованных образцов. СМ – смектитовая фаза; И – иллитовая фаза; Хл + Кл – сумма фаз хлорита и каолинита

Table 2. Ratio of main mineral phases in silt fractions of investigated samples. СМ – smectite phase; И – illite phase; Хл + Кл – sum of chlorite and kaolinite phases

Глубина отбора	Горизонт	Содержание илистой фракции, %	Доля минеральных фаз в фракции <1 мкм			Доля минеральных фаз на почве в целом, %		
			СМ (1.8 нм)	И (1.0 нм)	Хл + Кл (0.7 нм)	СМ (1.8 нм)	И (1.0 нм)	Хл + Кл (0.7 нм)
Разрез РЛ-1 Слитозем квазиглеевый элювируемый карбонатный окисленно-глеевый								
0–6	Wpir	21	1	87	12	0,2	18.3	2.5
6–12	Q1el,ox/Q2ox	23	8	83	9	1,8	19.1	2.1
20–30	Q3ox	53	12	80	8	6,4	42.4	4.2
50–60	BCsa,q	40	29	61	9	11,6	24.4	3.6
90–100	BCsa,q,v, nc	42	35	56	9	14,7	23.5	3.8
Разрез РЛ-2 Слитозем квазиглеевый сегрегационно-карбонатный окисленно-глеевый								
0–9	Q1ca,ox	45	24	68	8	10,8	30.6	3.6
7(8)–20	Q2ca,nc	48	30	58	12	14,4	27.8	5.8
20–30	Q3ca,nc	41	32	59	9	13,1	24.2	3.7
40–50	Qca,nc,v	48	30	60	10	14,4	28.8	4.8
60–70	Q/Vca,nc	45	37	53	10	16,7	23.9	4.5
70–90	Q/Vca,nc	52	28	60	12	14,6	31.2	6.2
120–140	BCsa,q,v	59	31	57	12	18,3	33.6	7.1
140–150	BCsa,q,v	61	26	61	13	15,9	37.2	7.9

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Глубина отбора	Горизонт	Содержание илистой фракции, %	Доля минеральных фаз в фракции <1 мкм			Доля минеральных фаз на почве в целом, %		
			СМ (1.8 нм)	И (1.0 нм)	Хл + Кл (0.7 нм)	СМ (1.8 нм)	И (1.0 нм)	Хл + Кл (0.7 нм)
Шоколадные глины								
175–190	Ccs,ca	19	44	47	9	8.4	8.9	1.7
220–230	Ccs,ca	60	19	66	15	11.4	39.6	9.0



Рис. 2. Нивелирный ход, проходящий через исследованные профили (отмечены точками).
Fig. 2. The levelling traverse running through the survey soil pits (marked with dots).

Распределение минеральных фаз по профилям

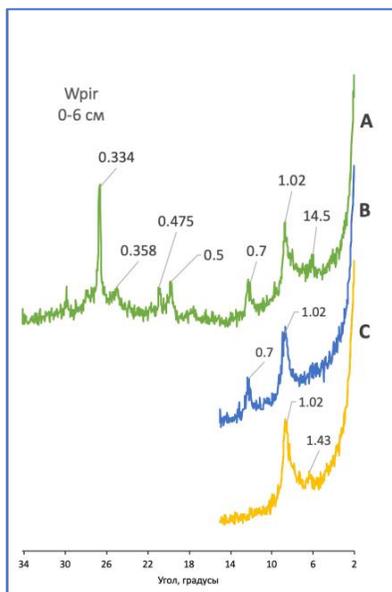
Во всех почвенных горизонтах значительно преобладает иллитовый компонент, при этом в разрезе РЛ-1 его доля несколько больше (56–87%) в сравнении с РЛ-2 (53–68%). В первом разрезе распределение данного компонента носит равномерно-аккумулятивный характер (постепенное уменьшение с глубиной). Тогда как во втором разрезе распределение иллита близко к равномерному с незначительными колебаниями по всему профилю. Сумма каолинита и хлорита варьирует от 9% до 12% в первом профиле и от 8% до 13% во втором.

Смектитовый компонент в наименьшем количестве выявлен в поверхностных горизонтах профиля РЛ-1 – в гумусово-слаборазвитом и квазиглеевом элювиированном – 1% и 8% соответственно. Максимальная доля этого компонента – в горизонтах с признаками слитогенеза в обоих профилях. В первом профиле происходит увеличение доли фазы с глубиной, тогда как во втором профиле можно отметить некоторую слоистость по ее доле в илистой фракции.

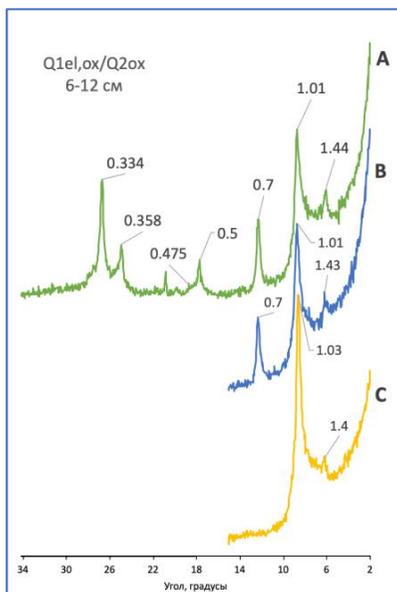
Отдельно стоит охарактеризовать соотношение фаз в образцах шоколадных глин. Помимо значительных различий в содержании илистой фракции – 19% (175–190 см) и 60% (220–230см) – отмечается существенное расхождение в долях минеральных фаз, особенно смектитовой – 44 и 19% соответственно.

Качественная характеристика минеральных фаз

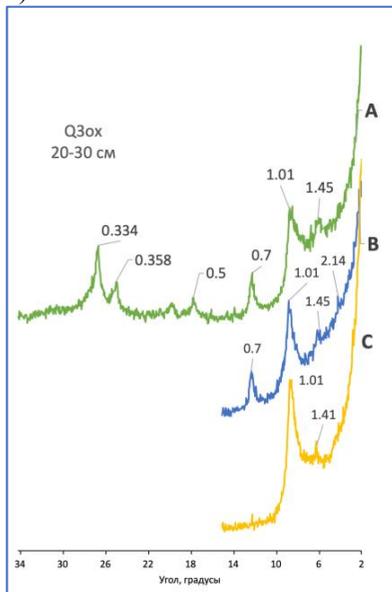
Смектитовая фаза включает в себя преимущественно смешанослойный компонент, диагностированный по наличию нецелочисленной серии базальных рефлексов в области 1.5–2.0 нм на дифрактограммах насыщенных этиленгликолем образцов. Смешанослойные образования неупорядоченные. “Площадка”, соединяющая рефлексы 1.4–1.45 и 1.0 нм (как при съемке воздушно-сухих фракций, так и насыщенных), говорит о смектит-иллитовом составе этого компонента. В верхних горизонтах, по-видимому, за счет высокой степени выветрелости и супердисперсности смешанослойная фаза при насыщении дает “галло” без выраженных рефлексов. С глубиной ее окристаллизованность повышается (рис. 3г, 3д, рис. 5д–з).



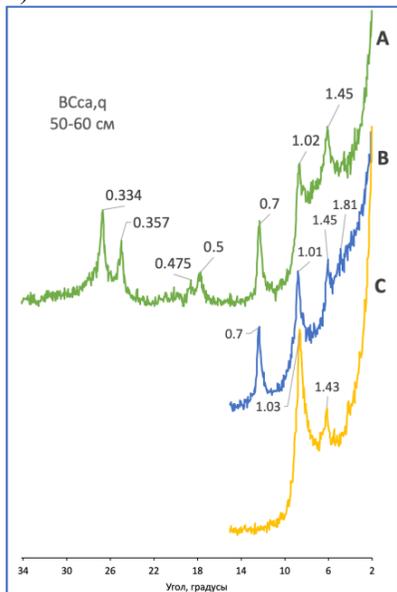
а)



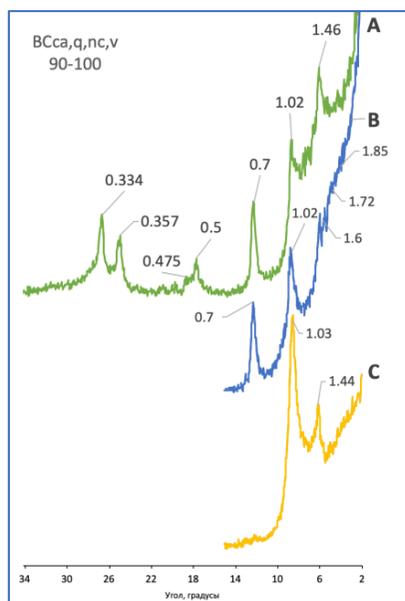
б)



в)



г)



Д)

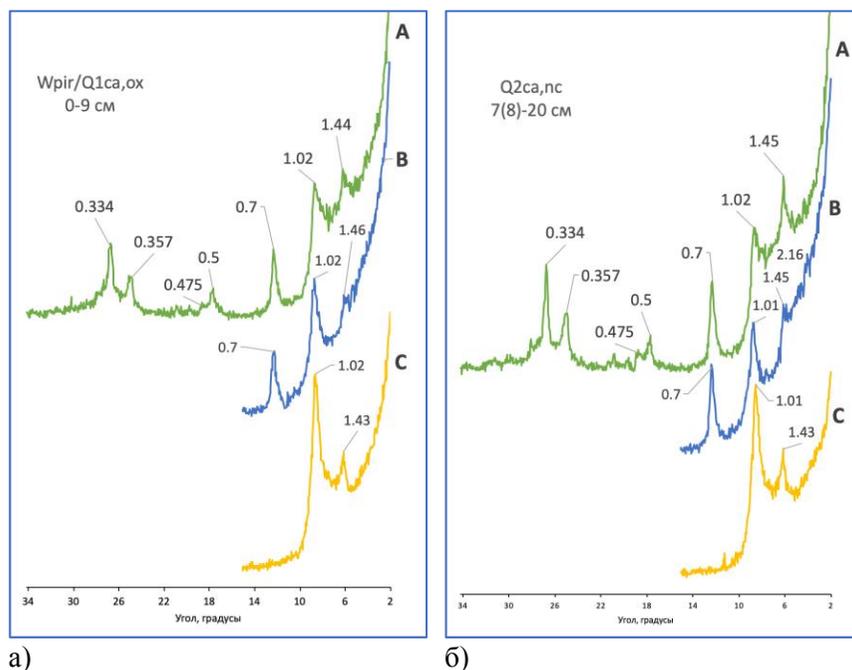
Рис. 3. Рентгендифрактограммы илистых фракций образцов профиля РЛ-1 (слитозем квазиглеевый элювиированный карбонатный окисленно-глеевый). А – воздушно-сухое состояние образца, В – после сольватации этиленгликолем, С – после прокаливания при 550 °С в течение 2 ч. Межплоскостные расстояния указаны в нанометрах.

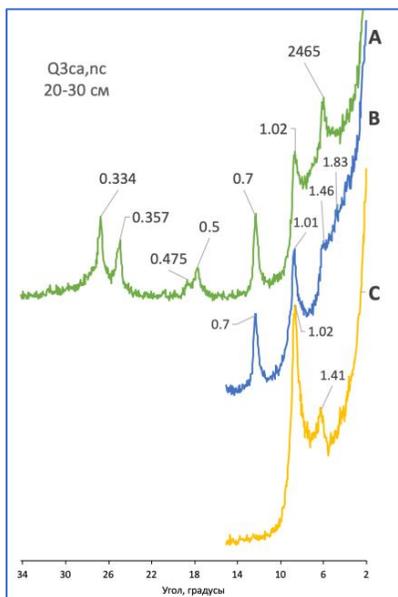
Fig. 3. X-ray diffractograms of clay (<1 μm) fractions of samples from soil pit PJI-1 (slitozem quasi-gley eluted carbonate oxidized-gley). А – air-dry state of the sample, В – after solvation with ethylene glycol, С – after heating at 550 °C for 2 h. The interplanar distances are given in nanometres.

Также увеличивается и доля смектитовых пакетов, что подтверждает возрастающая асимметрия пика 1.4–1.45 нм воздушно-сухих фракций в малоугловую область. Помимо смешанослойных образований в отдельных горизонтах (рис. 4з, рис. 5а, 5б) по наличию слабого рефлекса 0.8–0.9 нм (Лесовая, Чижикова, 2007) в незначительных количествах диагностирован индивидуальный смектит. Проведенная реакция калиевой контракции (тест Уивера, Weaver, 1958) говорит о принадлежности данного смектита (а

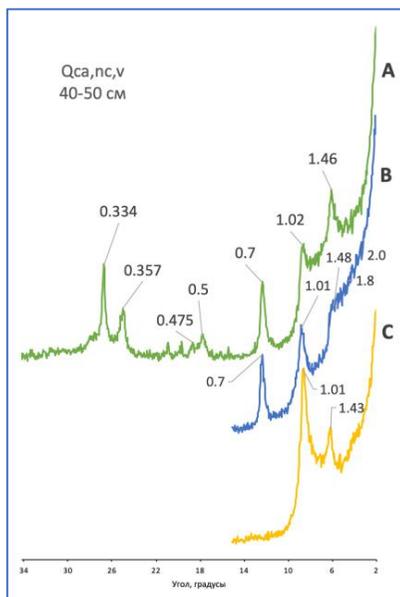
также смектитовых пакетов, участвующих в смешанослойных образованиях) к высокозарядному типу. При насыщении илистой фракции раствором хлорида калия происходит смещение рефлекса из положения 1.4 нм к 1.0 нм за счет необменной фиксации катиона.

Соотношение рефлексов первого (1.0 нм) и второго (0.5 нм) порядков **иллита** ($I_{001}/I_{002} > 4$) говорит о присутствии его биотитовой разновидности с триоктаэдрическим типом заполнения октаэдрического слоя (Соколова, Дронова, Толпешта, 2003). Стоит отметить более высокую окристаллизованность данного компонента в профиле РЛ-1, особенно в илистой фракции горизонта Q1e1,ox (рис. 3б).

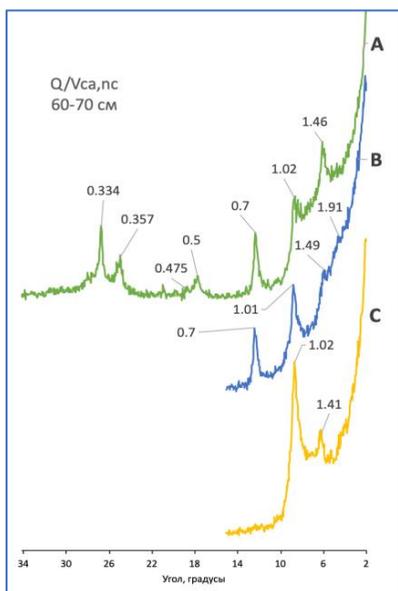




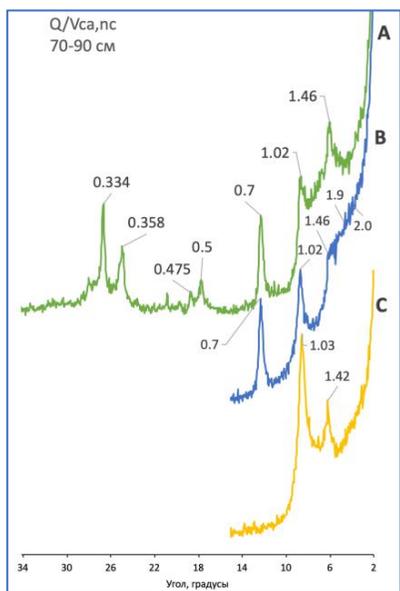
В)



Г)



Д)



е)

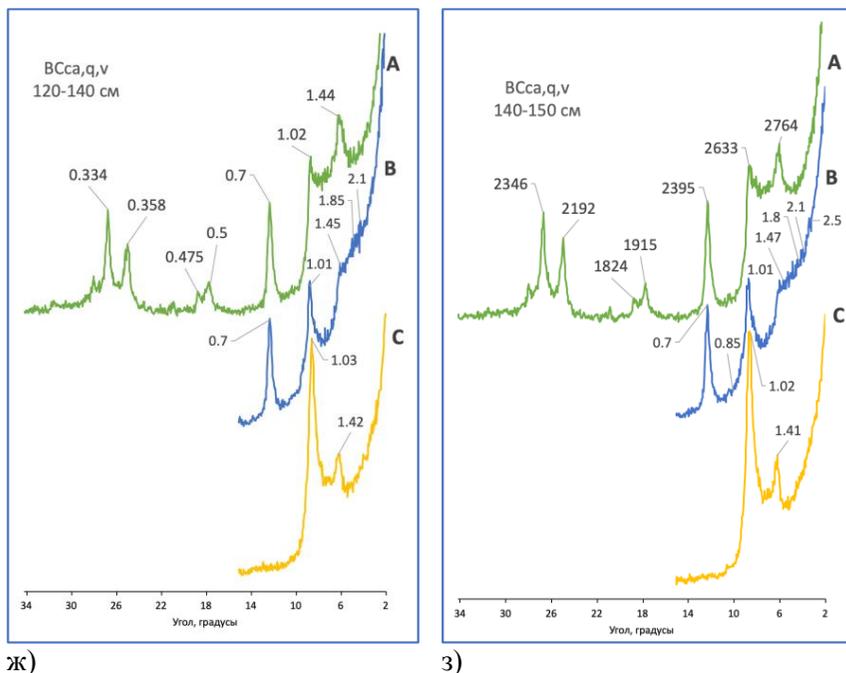


Рис. 4. Рентгендифрактограммы илстых фракций образцов профиля РЛ-2 (слитозем квазиглеевый сегрегационно-карбонатный окисленно-глеевый). А – воздушно- сухое состояние образца, В – после сольватации этиленгликолем, С – после прокаливания при 550°C в течение 2 ч. Межплоскостные расстояния указаны в нанометрах.

Fig. 4. X-ray diffractograms of clay (<1µm) fractions of samples from soil pit PJL-2 (slitozem quasi-gley segregated carbonate oxidised gley). A – air-dry state of the sample, B – after solvation with ethylene glycol, C – after heating at 550 °C for 2 h. The interplanar distances are given in nanometres.

По выраженному рефлексу 1.4–1.43 нм на рентгендифрактограммах прокаленных образцов (рис. 3–4) илстых фракций диагностирован **хлорит**, который не разрушается при 550 °C. В воздушно-сухом состоянии этот минерал дает рефлексы 1.4 (который совпадает со смектитовой фазой) и 0.475 нм. Так как нами не отмечено уменьшение межплоскостного расстояния при прокаливании, мы считаем, что в данном случае хлорит относится преиму-

щественно к магнезиальной разновидности (Соколова, Дронова, Толпешта, 2003).

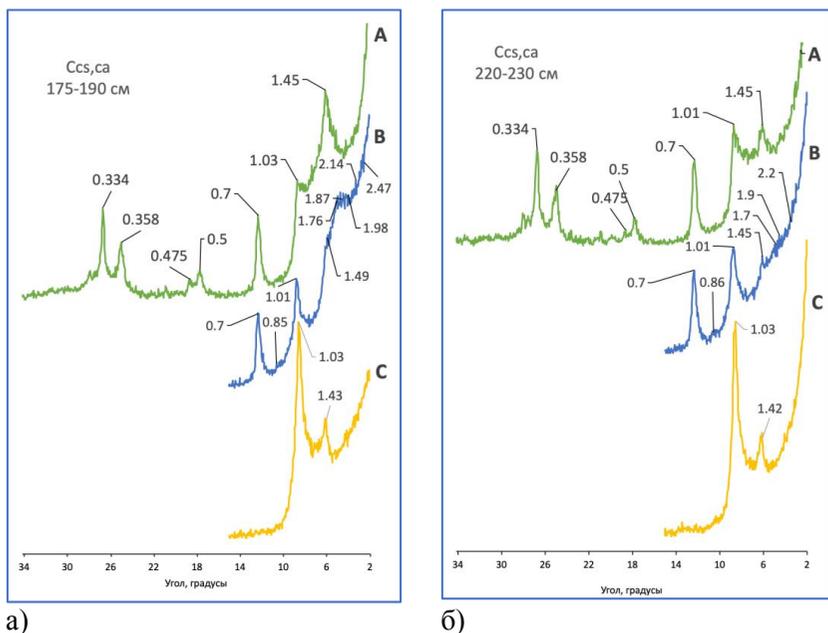


Рис. 5. Рентгендифрактограммы илстых фракций образцов шоколадных глин профиля РЛ-1. А – воздушно- сухое состояние образца, В – после сольватации этиленгликолем, С – после прокаливании при 550°С в течение 2 ч. Межплоскостные расстояния указаны в нанометрах.

Fig. 5. X-ray diffractograms of clay ($<1\ \mu\text{m}$) fractions of samples from soil pit PJ-1 (slitozem quasi-gley eluted carbonate oxidized-gley). A – air-dry state of the sample, B – after solvation with ethylene glycol, C – after heating at 550 °C for 2 h. The interplanar distances are given in nanometres.

Каолинит диагностирован по рефлексу 0.7 нм (совмещенный с рефлексом хлорита) в воздушно-сухом состоянии. Рефлекс не изменяется при сольватации этиленгликолем (рис. 4а–ж, линия “С” на графиках), но при прокаливании минерал разрушается и не дает отражений. Форма основного диагностического рефлекса говорит о его несовершенной структуре. С глубиной рефлекс стано-

вится более узким и острым, что говорит о меньшем воздействии процесса почвообразования.

В целом кристаллохимическое состояние описанных выше минералов не различается между илистыми фракциями двух профилей.

Анализ илистых фракций шоколадных глин показал большую неоднородность почвообразующей породы в зависимости от глубины залегания исследуемого слоя. Это отражается не только на содержании илистой фракции и соотношении минеральных фаз (табл. 2), но и в их кристаллохимическом состоянии (рис. 5а, 5б).

В статьях, рассматривающих минералогический состав почв лиманов Волгоградской области, отсутствуют данные о морфологическом строении почв и морфометрические характеристики признаков слитогенеза (в случае, когда авторы называют почвы слитыми). Это может быть связано как с отсутствием слитогенеза в принципе, так и с недостаточной изученностью данного процесса в 70–80-е гг. прошлого века. Оценивая совокупность таких факторов как географическое положение, гидротермический режим и почвообразующие породы, мы допускаем, что для почв лиманов Рахинский и Большой Царын также характерны слитые и слитизированные почвы, и считаем сравнение данных минералогического анализа допустимым.

Полученные нами результаты тесно коррелируют с литературными данными по минералогическому составу аналогичных объектов. Почвы лимана Большой Царын ([Травникова, Мясников, 1973](#)) и Рахинский ([Пак и др., 1973](#)) также характеризуются преобладанием иллитовой фазы, при этом доля смектитовой фазы сопоставима с суммой каолинита и хлорита.

Колебания содержания илистой фракции и доли набухающей фазы, которое особенно хорошо прослеживается в профиле РЛ-2, мы связываем с включением в почвенный профиль слоев шоколадных глин. Несмотря на то, что на макроморфологическом уровне при полевом описании почв слоистость не прослеживалась, она могла сохраниться на уровне гранулометрического и минералогического составов. С одной стороны, слои шоколадных глин деформировались и “перерабатывались” в процессе почвообразования, в частности этому способствовали незначительные пе-

дотурбации при слитогенезе. С другой – указанные педотурбации (вопреки изначальным представлениям об этом процессе в верти-солях) не приводят к значительному перемешиванию материала ([Wilding, Tessier, 1988](#); [Mermut et. al., 1996](#)).

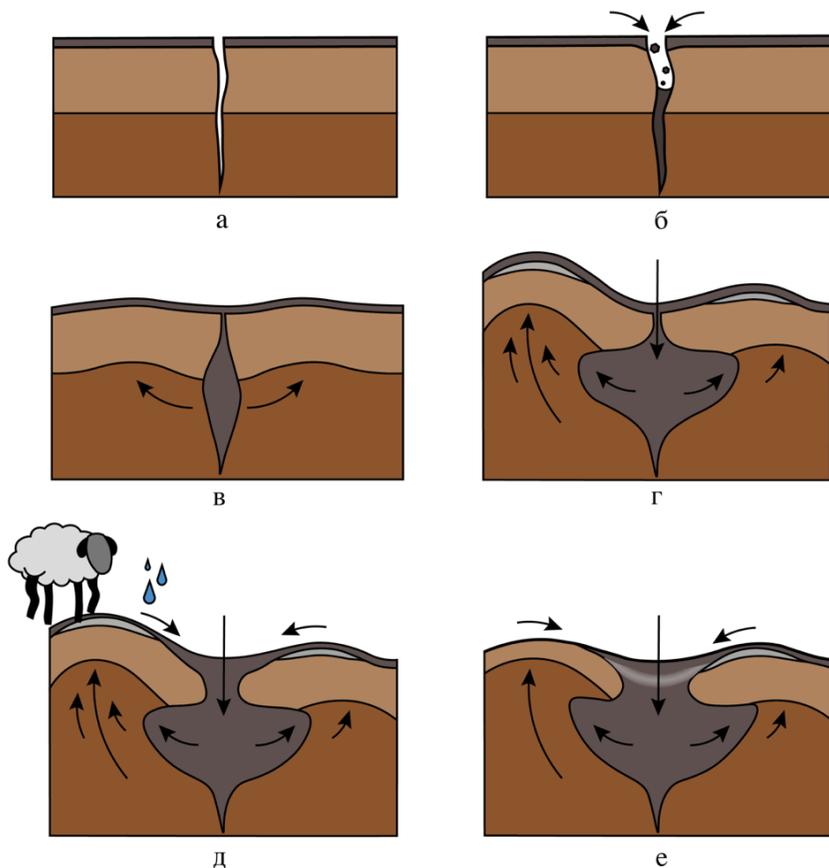


Рис. 6. Схема формирования микрорельефа на исследованном участке лимана Большого. Пояснения этапов в тексте.

Fig. 6. Diagram of microrelief formation in the investigated plot of the liman Bolshoi. Explanation of the stages are given in the text.

Этапы формирования почвенной комбинации лимана Большой подробно описаны Н.Б. Хитровым (2020): основные деформации поверхности были вызваны засыпками материала в трещины (рис. 6а–б), что при увлажнении и набухании привело к подъему материала и образованию микроповышений (рис. 6в). В данном случае можно лишь предложить несколько дополнений – локальные выдавливания происходили *неравномерно*, что приводило к появлению бугорков с *разными* относительными высотами (рис. 6г). При этом мы предполагаем, что изначально все микроповышения имели признаки элювиирования в верхней части профиля, но за счет локальной эрозии (выпас скота, выгорание растительности, перенос материала с током воды) с более высоких бугорков гумусовый и элювиированный материал удалялся (рис. 6д–е), накапливаясь в понижениях. Таким образом, рельеф постепенно выравнивался, и микроповышения оказались на одинаковой относительной высоте, при этом на отдельных повышениях ранее выдавленный глинистый материал оказался ближе к поверхности (рис. 6е). Последнее объясняет более тяжелый гранулометрический состав всего профиля РЛ-2, вскипание с поверхности и обилие белоглазки, так как изначально этот материал формировался из засоленных шоколадных глин, которые были сильно переработаны в процессе почвообразования.

Данное предположение подкрепляется данными минералогического анализа – верхние горизонты профиля РЛ-2, которые сейчас находятся в верхней части профиля, близки к нижней части профиля РЛ-2 как по содержанию ила, так и по соотношению минеральных фаз и их кристаллохимическому состоянию. Этот факт может свидетельствовать о произошедшей ранее эрозии близких к поверхности горизонтов профиля РЛ-1.

Оценка связи активности слитогенеза с количеством ила, а также с его минеральным составом показывает, что эти параметры не имеют прямой зависимости. В исследованных профилях присутствовали горизонты с высокой долей и илистой фракции, и смектитового компонента в ней, но при этом меньшей степенью выраженности признаков слитогенеза (к примеру, горизонты ВС обоих профилей, табл. 2). Кроме того, уже на этапе морфологического описания почв в поле можно отметить влияние такого

фактора как влажность почвы. Это говорит о динамичности выраженности признаков слитогенеза в течение года. Кроме того, вышесказанное еще раз подчеркивает важность комплексного подхода в оценке признаков, влияющих на активность слитогенеза в почвах.

ВЫВОДЫ

1. Почвы данного лимана представлены двумя подтипами слитоземов – элювиированными и сегрегационно-карбонатными, которые располагаются на одних и тех же элементах микрорельефа – микроповышениях.

2. В данном случае процессы слитогенеза возникают при наличии 26–37% смектитового компонента (преимущественно смектит-иллитовых смешанослойных образований) в илистой фракции. При этом доля илистой фракции в горизонтах с наиболее выраженными признаками составила 48–52%.

3. Степень выраженности слитогенеза не зависела от доли смектитового компонента, а была обусловлена, скорее всего, комплексом факторов. Именно комплексный подход необходимо использовать при оценке активности процессов слитогенеза.

4. Различия почв на уровне подтипа мы объясняем историей формирования микрорельефа, одним из этапов которого была локальная эрозия верхних горизонтов. Для подкрепления этой теории требуются дальнейшие исследования – сравнение данных химических анализов, а также микроморфологический анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горбунов Н.И.* Методика подготовки почв к минералогическим анализам. Методы минералогического и микроморфологического изучения почв. М.: Наука, 1971. С. 5.
2. *Доскач А.Г.* Природное районирование Прикаспийской полупустыни / Отв. ред. С.В. Зонн. М.: Наука, 1979, 142 с.
3. *Жукова Ю.А.* Геохимическая структура и процессы ее формирования в комплексах слитых почв: Диссертация на соискание степени кандидата биологических наук: 03.02.13. М. 2016. 139 с.
4. *Ковда И.В.* Географические закономерности проявления слитогенеза в почвах Центрального Предкавказья: Дисс. ... канд. геогр. н. М. 1992.

5. *Ковда И.В., Морзун Е.Г., Алексеева Т.В.* Формирование и развитие почвенного покрова гильгай (на примере Центрального Предкавказья) // Почвоведение. 1992. № 3. С. 19–34.
6. *Корнблом Э.А.* Минералогический состав тонкодисперсных фракций и генезис почв Волго-Ахтубинской поймы: Автореф. дисс. ... к. б. н. М. 1966.
7. *Корнблом Э.А., Дементьева Т.Г.* Химико-минералогические особенности лиманных солодей пустынно-степного Заволжья // Почвоведение. 1976. № 8. С. 107–121.
8. *Лесовая С.Н., Чижикова Н.П.* Пособие по изучению глинистых минералов в почвах. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского Университета, 2007. 52 с.
9. *Пак К.П., Травникова Л.С., Цюрупа И.Г.* Химико-минералогические особенности слитых почв орошаемых районов Поволжья // Вестник сельскохозяйственной науки. 1973. № 10. С. 33–46.
10. *Полевой определитель почв.* М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
11. *Соколова Т.И., Дронова Т.Я., Толпешта И.И.* Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.
12. *Травникова Л.С., Мясников В.В.* Особенности профиля глинистого материала почв солонцового комплекса лимана Б. Царын, Сарпинской низменности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1973. Вып. 6. С. 100–109.
13. *Турсина Т.В.* Почвы лиманов и их мелиоративная характеристика // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. Вып. 7. 1973. С. 71–103.
14. *Хитров Н.Б.* Генезис, диагностика, свойства и функционирование глинистых набухающих почв Центрального Предкавказья. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 505 с.
15. *Хитров Н.Б., Власенко В.П., Рухович Д.И., Брызжесв А.В., Калинина Н.В., Роговнева Л.В.* География вертисолей и вертиковых почв Кубано-Приазовской низменности // Почвоведение. 2015. № 7. С. 771–790. DOI: [10.7868/S0032180X15070047](https://doi.org/10.7868/S0032180X15070047).
16. *Хитров Н.Б., Калинина Н.В., Роговнева Л.В., Рухович Д.И.* Слитоземы и слитизированные почвы России. М.: ИД Академии Жуковского, 2020. 516 с.
17. *Хитров Н.Б., Роговнева Л.В.* Вертисоли и вертиковые почвы Поволжья // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1383–1403. DOI: [10.7868/S0032180X14090068](https://doi.org/10.7868/S0032180X14090068).
18. *Хитров Н.Б., Роговнева Л.В.* Гранулометрический состав вертисолей и вертиковых почв России // Почвоведение. 2017. № 3. С. 329–344. DOI:

[10.7868/S0032180X17030066](https://doi.org/10.7868/S0032180X17030066).

19. *Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И., Чижикова Н.П., Роговнева Л.В.* Почвы Каменной Степи, имеющие признаки слитогенеза (вертигенеза) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 72. С. 3–25. DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-3-25](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-3-25).

20. *Хитров Н.Б., Чижикова Н.П.* Минералогический состав слитых почв Ставрополья // Почвоведение. 1995. № 8. С. 987–1002.

21. *Ahmad N.* Acid vertisols in Trinidad. Proc. of the 5th Int. Soil Classification workshop. Sudan: Soil Survey Administration, Khartoum, 1985. P. 97–115.

22. *Bhattacharyya T., Pal D.K., Deshpande S.B.* On kaolinitic and mixed mineralogy classes of shrink-swell soils // Aust. J. Soil Res. 1997. Vol. 35. P. 1245–1252.

23. *Bhattacharyya T., Pal D.K., Mandal C., Chandran P., Ray S.K., Dipak Sarkar, Velmourougane K., Srivastava A., Sidhu G.S., Singh R.S., Sahoo A.K., Dutta D., Nair K.M., Srivastava R., Tiwary P., Nagar A.P., Nimkhedkar S.S.* Soils of India: Historical Perspective, Classification and Recent Advances // Current Science 104. 2013. No. 10. P. 1308–323. URL: <http://www.jstor.org/stable/24092506>.

24. *Biscaye P.E.* Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Oceans // Geol. Soc. Am. Bulletin. 1965. Vol. 76. No. 7. P. 803–832. DOI: [10.1130/0016-7606\(1965\)76\[803:MASORD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2).

25. *Coulombe C.E., Dixon J.B., Wilding L.P.* Mineralogy and chemistry of vertisols. In: Ahmad N. and Mermut A. (Eds.) Vertisols and technologies for their management. Developments in Soil Science 24. Amsterdam; Elsevier, 1996. P. 115–200.

26. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. An international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. 2014. No. 106.

27. *Kabaktschiew I., Mückenhausen E.* Die Tonminerale einiger Smolnitzen Bulgariens // Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. 1969. Vol. 122. P. 97–111. DOI: [10.1002/jpln.19691220202](https://doi.org/10.1002/jpln.19691220202).

28. *Kovda I.* Vertisols: Extreme features and extreme environment // Geoderma Regional. 2020. Vol. 22. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00312](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00312).

29. *Kovda I., Goryachkin S., Lebedeva M., Chizhikova N., Kulikov A., Badmaev N.* Vertic soils and Vertisols in cryogenic environments of southern Siberia, Russia // Geoderma. 2017. No. 288. P. 184–195. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.11.008](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.008).

30. *Mermut A.R., Dasog G.S., Dowuona G.N.* Chapter 4. Soil Morphology.

Vertisols and Technologies for Their Management. Ahmad N., Mermut A. (Eds). Amsterdam: Elsevier, 1996. P. 89–114.

31. Weaver C.E. The effect and geological significance of potassium “fixation” by expandable clay minerals derived from muscovite, biotite, chlorite, and volcanic material // *The American Mineralogist*. 1958. Vol. 43. No. 9–10. P. 839–861.

32. Wilding L.P., Tessier D. Genesis of Vertisols: shrink-swell phenomena. Vertisols: Their Distribution, Properties, Classification and Management. Wilding L.P., Puentes R. (Eds). Texas, 1988. P. 55–81.

REFERENCES

1. Gorbunov N.I., *Metody mineralogicheskogo i mikromorfologicheskogo izucheniya pochv* (Methods of mineralogical and micromorphological studies of soils), Moscow: Nauka, 1971, 515 p.
2. Doskach A.G., *Prirodnoe raionirovanie Prikaspiiskoi polupustyni* (Natural zoning of the Caspian semi-desert), Moscow: Nauka, 1979, 142 p.
3. Zhukova Yu.A., *Geokhimicheskaya struktura i protsessy ee formirovaniya v kompleksakh slitykh pochv: Diss. ... kand. biol. nauk* (Geochemical structure and processes of its formation in vertic soils complexes, Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 2016, 139 p.
4. Kovda I.V., *Geograficheskie zakonomernosti proyavleniya slitogeneza v pochvakh Tsentral'nogo Predkavkaz'ya: Diss. ... kand. geogr. nauk* (Geographical regularities of manifestation of vertic processes in Central Ciscaucasian soils, Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 1992, 315 p.
5. Kovda I.V., Morgun E.G., Alekseeva T.V., *Formirovanie i razvitie pochvennogo pokrova gil'gai (na primere Tsentral'nogo Predkavkaz'ya)* (Formation and development of soil landscape of gilgai (the case of Central Ciscaucasia), *Pochvovedenie*, 1992, Vol. 3, pp. 19–34.
6. Kornblyum E.A., *Mineralogicheskii sostav tonkodispersnykh fraktsii i genezis pochv Volgo-Akhtubinskoi poimy: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* (Mineralogical composition of fine fractions and genesis of Volga-Akhtuba floodplain soils, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Moscow, 1966.
7. Kornblyum E.A., Dement'eva T.G., *Khimiko-mineralogicheskie osobennosti limannykh solodei pustynno-stepnogo Zavolzh'ya* (Chemical and mineralogical features of liman malts in the desert-steppe of Trans-Volga region), *Pochvovedenie*, 1976, Vol. 8, pp. 107–121.
8. Lesovaja S.N., Chizhikova N.P., *Posobie po izucheniju glinistyykh mineralov v pochvakh* (Guide for studying clay minerals in soils), Saint-Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo Universiteta, 2007, 52 p.

9. Pak K.P., Travnikova L.S., Tsyurupa I.G., Khimiko-mineralogicheskie osobennosti slitykh pochv oroshaemykh raionov Povolzh'ya (Chemico-mineralogical aspects of vertic soils in the irrigated areas of Volga region), *Vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 1973, Vol. 10, pp. 33–46.
10. *Polevoi opredelitel' pochv* (Soil Field Guide), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.
11. Sokolova T.I., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I., *Glinistye mineraly v pochvakh* (Clay minerals in soils), Tula: Grif i K, 2005, 336 p.
12. Travnikova L.S., Myasnikov V.V., Osobennosti profilya glinistogo materiala pochv solontsovogo kompleksa limana B. Tsaryn, Sarpinskoi nizmennosti (Aspects of clay material profile of solonetz complexes of B. Tsaryn liman, Sarpinskaya lowland), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1973, Vol. 6, pp. 100–109.
13. Tursina T.V., Pochvy limanov i ikh meliorativnaya kharakteristika (Soils of limans and their characteristics), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1973, Vol. 7, pp. 71–103.
14. Khitrov N.B., *Genezis, diagnostika, svoistva i funktsionirovanie glinistyykh nabukhayushchikh pochv Tsentral'nogo Predkavkaz'ya*. (Genesis, diagnostics, properties and functioning of clayey swelling soils of Central Ciscaucasia), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2003, 505 p.
15. Khitrov N.B., Vlasenko V.P., Rukhovich D.I., Bryzzhev A.V., Kalinina N.V., Rogovneva L.V., Geografiya vertisolei i vertikovyykh pochv Kubano-Prizovskoi nizmennosti (Geography of Vertisols and soils with vertic features within Kuban'-Azov lowland), *Pochvovedenie*, 2015, No. 7, DOI: [10.7868/S0032180X15070047](https://doi.org/10.7868/S0032180X15070047).
16. Khitrov N.B., Kalinina N.V., Rogovneva L.V., Rukhovich D.I., *Slitozemy i slitizirovannye pochvy Rossii* (Vertisols and soils with vertic features of Russia), Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 2020, 516 p.
17. Khitrov N.B., Rogovneva L.V., Vertisoli i vertikovyye pochvy Povolzh'ya (Vertisols and soils with vertic features of the Volga region), *Pochvovedenie*, 2014, No. 12, pp. 1383–1403, DOI: [10.7868/S0032180X14090068](https://doi.org/10.7868/S0032180X14090068).
18. Khitrov N.B., Rogovneva L.V., Granulometricheskii sostav vertisolei i vertikovyykh pochv Rossii (Granulometric composition of Vertisols and soils with vertic features of Russia), *Pochvovedenie*, 2017, No. 3, pp. 329–344, DOI: [10.7868/S0032180X17030066](https://doi.org/10.7868/S0032180X17030066).
19. Khitrov N.B., Cheverdin Yu.I., Chizhikova N.P., Rogovneva L.V., Pochvy Kamennoi Step'i, imeyushchie priznaki Slitogeneza (vertigeneza) (Soils of Kamennaya Steppe with signs of vertic processes), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 72, pp. 3–25, DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-3-25](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-3-25).

20. Khitrov N.B., Chizhikova N.P., Mineralogicheskii sostav slitykh pochv Stavropol'ya (Mineralogical composition of vertic soils of Stavropol region), *Pochvovedenie*, 1995, No. 8, pp. 987–1002.
21. Ahmad N., *Acid vertisols in Trinidad*, Proc. of the 5th Int. Soil Classification workshop, Sudan, 1982, Soil Survey Administration, Khartoum (Sudan), 1985, pp. 97–115.
22. Bhattacharyya T., Pal D.K., Deshpande S.B., On kaolinitic and mixed mineralogy classes of shrink-swell soils, *Aust. J. Soil Res.*, 1997, Vol. 35, pp. 1245–1252.
23. Bhattacharyya T., Pal D.K., Mandal C., Chandran P., Ray S.K., Dipak Sarkar, Velmourougane K., Srivastava A., Sidhu G.S., Singh R.S., Sahoo A.K., Dutta D., Nair K.M., Srivastava R., Tiwary P., Nagar A.P., Nimkhedkar S.S. Soils of India: Historical Perspective, Classification and Recent Advances, *Current Science* 104, 2013, No. 10, pp. 1308–323. URL: <http://www.jstor.org/stable/24092506>.
24. Biscaye P.E., Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Oceans, *Geol. Soc. Am. Bulletin*, 1965, Vol. 76, No. 7, pp. 803–832, DOI: [10.1130/0016-7606\(1965\)76\[803:MASORD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2).
25. Coulombe C.E., Dixon J.B., Wilding L.P., Mineralogy and chemistry of vertisols, In: Ahmad N. and Mermut A. (Eds.) *Vertisols and technologies for their management. Developments in Soil Science 24*, Amsterdam: Elsevier, 1996, pp. 115–200.
26. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, An international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports, 2014, No. 106.
27. Kabaktschiew I., Mückenhausen E., Die Tonminerale einiger Smolnitzen Bulgariens, *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 1969, Vol. 122, pp. 97–111, DOI: [10.1002/jpln.19691220202](https://doi.org/10.1002/jpln.19691220202).
28. Kovda I., Vertisols: Extreme features and extreme environment, *Geoderma Regional*, 2020, Vol. 22, DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00312](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00312).
29. Kovda I., Goryachkin S., Lebedeva M., Chizhikova N., Kulikov A., Badmaev N., Vertic soils and Vertisols in cryogenic environments of southern Siberia, Russia, *Geoderma*, 2017, No. 288, pp. 184–195, DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.11.008](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.008).
30. Mermut A.R., Dasog G.S., Dowuona G.N., Chapter 4. *Soil Morphology, Vertisols and Technologies for Their Management*, Ahmad N., Mermut A. (Eds), Amsterdam: Elsevier, 1996, pp. 89–114.
31. Weaver C.E., The effect and geological significance of potassium “fixation” by expandable clay minerals derived from muscovite, biotite,

chlorite, and volcanic material, *The American Mineralogist*, 1958, Vol. 43, No. 9–10, pp. 839–861.

32. Wilding L.P., Tessier D., *Genesis of Vertisols: shrink-swell phenomena. Vertisols: Their Distribution, Properties, Classification and Management*, Wilding L.P., Puentes R. (Eds), Texas, 1988, pp. 55–81.