УДК 581.5*631.41
DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-1-27-37

CC BY-NC

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИЛИСТОЙ ФРАКЦИИ МАРШЕВЫХ ПОЧВ ПОМОРСКОГО БЕРЕГА БЕЛОГО МОРЯ

Н. В. Агаджанова, И. Е. Багдасаров, Ю. А. Крюкова, П. В. Красильников*

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

* E-mail: krasilnikov@soil.msu.ru

Изучен минералогический состав илистой фракции маршевых почв на томболо — перемычке между материком и малым островом на Поморском берегу Белого моря. Почвы, находящиеся на разных частях маршей, характеризуются разной последовательностью отложений и вложенных в них почвенных горизонтов. В составе илистой фракции всех почв присутствовали слюдистые минералы (иллиты), каолинит, хлорит и смешанослойные иллит-вермикулит и хлорит-смектит. Отмечено варьирование минералогического состава глин как между почвенными горизонтами, так и между изученными профилями. По нашему мнению, варьирование определяется как составом отложений, так и почвенным выветриванием минералов, что подтверждает идею Т.А. Соколовой о сложном характере формирования минералогического состава глин в почвах на отложениях, переотложенных водой. Основным процессом выветривания в маршевых почвах была деградационная трансформация хлорита и, возможно, слюды с образованием смектитовых слоев. Эти процессы пространственно связаны с зонами аэрации маршевых почв, хотя бы периодически находящихся в окислительном режиме.

Ключевые слова: глинистая минералогия, синлитогенные почвы, почвы таежной зоны, иллиты, смектиты, смешанослойные минералы.

Введение

Важным направлением научной деятельности Татьяны Алексеевны Соколовой было исследование глинистой минералогии почв. География исследований охватывала практически всю территорию СССР и включала все природные зоны страны, что было отражено в обобщающей монографии (Соколова и др., 2005). Однако более всего среди обширного творческого наследия ученого отражены результаты изучения минералогии илистой фракции гумидных областей, прежде всего таежной зоны (Соколова, 1985). Одним из принципиальных вопросов в исследованиях Т.А. Соколовой была оценка скорости разрушения и трансформации глинистых минералов в почвах (Соколова, 2013) и, соответственно, соотношения в илистой фракции минералов, унаследованных от почвообразующих пород, и собственно продуктов педогенеза (Гагарина и др., 2014). В этом контексте интересны работы Т.А. Соколовой, посвященные минералогии почв на слоистых многочленных отложениях, в частности в поймах ручьев Центрально-Лесного государственного заповедника (Соколова и др., 2013). Исследования показали, что в пределах профилей аллювиальных дерново- и перегнойно-глеевых почв верхняя часть, сформированная в пределах покровных суглинков и продуктов их переноса водными потоками, существенно отличается по минералогическому составу илистой и тонкопылеватой фракций от подстилающей суглинистой морены. В перемытом материале были обнаружены неупорядоченные смешанослойные иллит-хлорит и хлорит-вермикулит. Согласно гипотезе авторов, источником обоих типов смешанослойных минералов является каменистый материал, содержащий слоистые силикаты гипергенного или постмагматического происхождения. В поймах рек этот материал, первоначально содержавшийся в моренных отложениях, подвергался механическому дроблению и переотложению водными потоками. В результате глинистые минералы высвобождаются из обломков и становятся частью пылеватой и алевритовой фракций современных почв в поймах ручьев. Идея о том, что в почвах, которые подвергаются воздействию водных потоков, глинистый материал представляет собой смесь продуктов переотложения почвообразующих пород из разных локаций и педогенных минералов, образовавшихся в результате трансформации породных слоистых силикатов, несомненно, является правильной и продуктивной.

Идеи Т.А. Соколовой о множественных источниках глинистых минералов в аллювиальных почвах могут быть применены и для анализа минералогии илистой фракции почв морских побережий. При этом отметим скудность сведений о глинистой минералогии почв маршей и мангров. В большинстве работ педогенная трансформация минералов не рассматривается, и почвы рассматриваются как седименты, то есть априори считается, что их мине-

© Агаджанова Н.В., Багдасаров И.Е., Крюкова Ю.А., Красильников П.В., 2025

ралогия определяется только процессами осадконакопления. В маршевых почвах Дании на побережье Северного моря в составе илистой фракции были обнаружены каолинит и иллит с примесью хлорита и смектита (He et al., 2012). Для прибрежных почв Флориды, США, отмечалось присутствие в илистой фракции каолинита, слюды и смектита со стороны Атлантического океана, а в почвах побережья со стороны Мексиканского залива в илах преобладали смешанослойный хлорит-вермикулит и каолинит-метагаллуазит (Coultas and Calhoun, 1976). Из данных работ можно сделать вывод, что состав глинистых минералов в маршевых почвах зависит в основном от источника материала, переотложенного в береговых отложениях. К тем же выводам пришли китайские исследователи, которые изучали минералогический состав илистой фракции в почвах эстуариев рек от Хуанхэ на севере до Чжудзян на юге страны (Ma et al., 2010). Они установили, что при движении с севера на юг в илах возрастало отношение содержания каолинита к иллиту и снижалось отношение смектита к хлориту, что объяснялось тем, что интенсивность выветривания возрастала в более теплом и влажном климате; подразумевалось, что климат влиял не на минералообразование собственно в маршевых почвах, а определял состав глин в почвах водосборного бассейна рек, служащих источником материала для береговых отложений. В то же время отмечались особенности, связанные с характером почвообразующих пород. Так, в почвах эстуария Хуанхэ было обнаружено аномально высокое содержание каолинита, поскольку материал, транспортируемый этой рекой, в значительной степени состоит из богатого каолинитом лесса. Авторы делают вывод, что помимо климата на состав глинистых минералов в почвах влияют материнская порода и особенности транспорта отложений. Интересны результаты исследований глинистых минералов почв эстуариев восточного побережья США (Hathaway, 1972), которые показали существенные отличия между составом илистых фракций отложений в эстуариях рек и собственно аллювиальных отложений вдоль течения реки. Автор также показал, что при движении с севера на юг возрастает доля каолинита в отложениях, однако только до побережья Северной Каролины, к югу от которого в составе илов резко возрастает содержание монтмориллонита, который в больших количествах встречается в осадочных породах на юге США. В тропических условиях в Бразилии илистая фракция мангровых почв содержала смектит, каолинит, иллит, гиббсит, а также примеси кварца и полевого шпата (Souza-Júnior et al., 2007). Местами обнаруживались также вермикулит, биотит, анатаз, галлуазит и гётит, что авторы также приписывали локальным особенностям накопления осадков. Также высказывалась гипотеза о том, что частично каолинит и смектит являются результатом уже внутрипочвенного выветривания.

О трансформации глинистых минералов в почвах побережий сведений не так много. В модельном эксперименте по выветриванию маршевой почвы была обнаружена тенденция к преобразованию вермикулита в смектит (De Arambarri, Talibudeen, 1987). Сообщалось о необычно быстром, в течение нескольких лет, образовании слабоокристаллизованного смешанослойного иллит-смектита за счет деградационной трансформации иллита в маршевых почвах в штате Делавэр, атлантическое побережье США (Velde and Church, 1999). На атлантическом побережье Франции, напротив, была зафиксирована, помимо растворения хлорита, трансформация смешанослойных иллит-смектитов, в ходе которой относительно увеличивалось количество иллитовых слоев (Mathé et al., 2007). Авторы отмечали, что в естественных условиях трансформация идет медленно, однако же при искусственном осушении почв изменение глинистых минералов происходит в течение нескольких десятков лет. В мангровых почвах Бразилии нестабильный в условиях побережья каолинит предположительно трансформировался в железистый иллит (Andrade et al., 2018). Однако к работам бразильской почвенно-минералогической школы имеет смысл относиться с определенной осторожностью, поскольку некоторые результаты не вполне соответствуют общепринятым воззрениям.

До настоящего времени отсутствуют сведения о составе глинистых минералов в тонкодисперсных фракциях почв приливно-отливной зоны Белого моря. В этой работе мы привели данные по минералогическому составу илистой фракции маршевых почв Поморского берега Белого моря и попытались дать первичную интерпретацию полученных результатов.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования. Работы проходили на участке между островом Лопский и Поморским берегом Онежской Губы Белого моря вблизи села Колежма, Беломорский район, Республика Карелия. Географические координаты объекта: 64°14′11″ с. ш. и 35°52′27″ в. д. Климат — умеренно морского северного типа с прохладным летом и мягкой снежной зимой, в год выпадает в среднем 435 мм осадков, среднегодовая температура 1 °C. Участок представляет собой томболо, характеризующееся высокой степенью неоднородности отложений, почв и растительности из-за сложного движения приливных и нагонных волн между островом и сушей. Наибольшее распространение имеют почвы, относящиеся к реферативным группам Fluvisols, Gleysols и Stagnosols (IUSS Working Group WRB, 2022). Для почв характерна оглеенность профиля, наличие железистых новообразований, большое количество включений, неоднородность по гранулометрическому составу, высокое значение pH верхних почвенных горизонтов от 5,5 до 7,5 (Багдасаров и др., 2023;

Bagdasarov et al., 2024 a, b). Практически вся площадь ключевого участка затапливается в прилив соленой морской водой, что обусловливает амфибиальный водный режим почв. В центральной части располагается ложбина, где периодически образуются соленые лужи. В южной части сформировалось постоянное соленое озеро. Растительный покров на территории томболо представлен сообществами как галофитных (*Juncus gerardii* L., *Carex salina* Wahlend), так и влаголюбивых видов, способных выдерживать засоление (*Calamagrostis neglecta* Ehrh., *Sonchus arvensis* L.).

Отбор проб для определения минералогического состава происходил в июле 2022 года. Опираясь на исследования, проведенные нами ранее на данном участке (Багдасаров, 2023), из 33 почвенных разрезов, заложенных в виде нерегулярной сетки, были выбраны три точки отбора проб, T11K, T17K, T20K, с тем расчетом, чтобы максимально охватить разнообразие почвенного покрова исследуемого участка. Выбор разрезов для отбора проб производился с ориентиром на особенности почвенного профиля, расположения его относительно границ томболо и растительные сообщества. Согласно разделению растительного покрова на уровни маршевой растительности разрез T11K находится в зоне низкого марша, то есть практически у уреза при малой воде, разрез T17K — в зоне соленых луж в центре томболо и разрез T20K — в зоне среднего марша по отметкам высот и по растительности. Максимальное значение солености воды в исследуемых разрезах было отмечено в точке T20K и составляло 14‰. Максимальное значение pH 7,5 наблюдалось в точке T17K: это одно самых высоких значений для всего участка. Несмотря на отдаленность точки от береговой линии, подщелачивание происходит за счет скопления морской воды в пониженной центральной части томболо (Багдасаров и др., 2023).

Методы. Классификация почв производилась по авторской классификации М.А. Цейца и Д.В. Добрынина (Tseyts, Dobrynin, 2005), разработанной для побережий Белого моря, и по Мировой базе данных почвенных ресурсов (IUSS Working Group WRB, 2022).

Илистая фракция отмучивалась из почвенных образцов по Горбунову (1963), полученные образцы насыщались кальцием, отмывались от избытка хлоридов, и из них изготавливались ориентированные препараты для съемки в воздушно-сухом состоянии после насыщения этиленгликолем и после прогрева до 350 и 550 °C. Минералогический состав илистой фракции определялся методом рентген-дифрактометрии. Рентгенограммы от ориентированных препаратов получали на приборе MiniFlex-600 (Rigaku, Япония) с высокоскоростным одномерным детектором D/teX Ultra2 с использованием CuKα излучения, фильтрованного Ni, с напряжением на трубке 40 кВ и током 15 мА. Содержание отдельных групп глинистых минералов рассчитывали по модифицированному методу Корнблюма (Соколова и др., 2005).

Результаты

Отложения и почвы. Почвы на объекте существенно отличаются между собой по гранулометрическому составу, его резкая смена наблюдается не только между разрезами, но и между горизонтами в рамках одного почвенного профиля. В целом на большей части ключевого участка верхний горизонт почв тяжелый, относящийся к градации пылеватого суглинка. В профиле T11K, находящемся на берегу при малой воде, верхние горизонты почвы тяжелосуглинистые, при этом верхние 10–15 сантиметров в разрезе содержат большое количество иловатого материала с органическими остатками разной степени разложения (таблица). С глубины же 30–35 см суглинистый материал подстилается песчаными отложениями. Подобная последовательность осадков характерна для береговых валов томболо, поскольку исходно формируются сильными нагонными волнами, аккумулирующими грубый песчаный материал, а при дальнейшей эволюции относительно энергетически слабый прилив приносит более тонкие частицы (Rodríguez-Ramírez et al., 2023). Точка T17K находится в центральной части томболо в понижении, где задерживается приливная вода и происходит накопление глинистого материала. В разрезе выделяется супесчаный поверхностный горизонт, с глубиной отложения сменяется тяжелосуглинистыми осадками, глубже, с 55 см, выделяются ленточные глины. Профиль T20K, который находится на среднем марше, имеет «сандвичевое» строение отложений: верхняя часть профиля сложена тяжелым суглинком, ниже залегает 10-сантиметровая прослойка супесчаных отложений, сменяющаяся ниже вновь тяжелыми суглинками.

Согласно авторской классификации М.А. Цейца и Д.В. Добрынина (Tseyts, Dobrynin, 2005) и по международной почвенной классификации (IUSS Working Group WRB, 2022) почвы были классифицированы как: T11K — маршевая перегнойно-квазиглеевая / Eutric Fluvic Histic Thionic Stagnosol (Loamic, Humic, Raptic), T17K — маршевая гумусово-глеевая / Eutric Stagnic Tidalic Thionic Gleysol (Loamic, Raptic), T20K — маршевая гумусово-глеевая / Eutric Fluvic Stagnic Histic Tidalic Thionic Gleysol (Loamic, Humic, Raptic).

Минералогический состав илистых фракций. Минералогический состав выделенных из почв илистых фракций по данным рентгеновской дифрактометрии характеризуется присутствием иллита, каолинита, хлорита, смешанослойных минералов с лабильными слоями (иллит-вермикулит и хлорит-смектит), а также некоторых неглинистых минералов (кварца, плагиоклаза, амфибола).

В разрезе T11K (рис. 1) в составе глин абсолютно преобладают слюдистые минералы и продукты их начальной трансформации, которые принято именовать иллитами (Толпешта, Соколова, 2013). В нашем случае могут присутствовать как иллиты

(диоктаэдрические структуры), так и триоктаэдрические слюды с дефицитом межслоевых катионов, что диагностируется по слабой интенсивности дифракционного максимума 0,49–0,50 нм. На дифрактограммах заметна асимметрия хорошо выраженных пиков 0,99–1,0 нм в сторону малых углов, что указывает на присутствие вермикулитовых слоев в структуре минерала; данные подтверждаются тем, что при прокаливании асимметрия исчезает. Разбухающая составляющая также имеется, однако в виде смектитовых слоев не в слюдоподобных минералах, а, скорее, в минералах группы хлорита. Это предположение можно обосновать неполным сжатием кристаллических решеток предполагаемых смешанослойных фаз до 1,0 нм после прокаливания при 550 °С. На рентгенограммах образцов из горизонтов 2BMq, 2CMq, насыщенных этиленгликолем, есть самостоятельный пик 1,59 нм, отражающий дискретную фазу разбухающего минерала. Можно предположить присутствие высокозарядного смектита; вермикулит после насыщения этиленгликолем может увеличить межплоскостное расстояние только до 1,5 нм. Пики 0,7 нм относятся к каолиниту, поскольку они полностью исчезают после прокаливания препаратов глин при 550 °С, однако сохраняющиеся при этом пики 1,38–1,41 нм указывают на наличие хлоритов. Слабо выраженный максимум 0,7 нм свидетельствует о том, что хлориты преимущественно триоктаэдрические. По профильному распределению отмечается относительно однородное распределение по иллиту (минералы с дифракционным максимумом на межплоскостных расстояниях около 1,0 нм) и по каолиниту (минералы с дифракционным максимумом на межплоскостных расстояниях около 0,7 нм), несмотря на контрастный гранулометрический состав отложений (таблица). Почва ниже 13 см обогащена смектитовым компонентом по сравнению с поверхностными горизонтами независимо от того, сложен горизонт тяжелым суглинком или песком.

В разрезе Т17К (рис. 2) также максимально представлены слюдоподобные минералы, но отмечается их меньшая окристаллизованность по сравнению с профилем Т11К, что выражается в менее интенсивных и более широких пиках в области 1,0 нм (рис. 2). Минерал определяется как продукт начального выветривания триоктаэдрических железистых слюд. Во всех горизонтах данного разреза содержится также каолинит, причем относительные его количества выше, чем в разрезе Т11К: в последнем отношение максимумов 0,7 нм к 1,0 нм составляет 0,3–0,4 против 0,6–0,7 в разрезе Т17К. Обращает на себя внимание высокое относительное содержание смектитовых компонентов: в верхних двух горизонтах отношение лабильных минералов к слюдистым минералам составляет 1,4 против 0,7–0,8 в нижних горизонтах. Следует отметить, что сходство по минералогическому составу показывают два верхних горизонта, существенно отличающихся по гранулометрии, которая определяется как супесь для слоя 0–10 см и тяжелый суглинок — для 10–26 см.

В разрезе Т20К (рис. 3) выделяются три горизонта, верхний и нижний из которых сходны как по гранулометрическому составу (тяжелый суглинок), так и по минералогическому составу глин. Для них характерно преобладание слюдистых минералов и относительно невысокое содержание каолинита, хлорита и разбухающих минералов. Между суглинистыми горизонтами залегает супесчаный прослой, имеющий принципиально другое распределение минералов (таблица): в составе глин преобладает смектитовый компонент, а содержание слюдистых минералов существенно ниже, чем во всех остальных горизонтах всех изученных почв. Содержание каолинита и хлорита невысокое. Таким образом, при всех чертах сходства минералогического состава глинистых минералов в изученных маршевых почвах имеются признаки неравномерности распределения минералов как между разными частями томболо, так и между горизонтами и слоями отложений отдельных почвенных профилей.

Таблица

Разрез	Горизонт	Глубина	Гранулометрический состав	Относительное содержание от суммы 3-х компонентов, %			Каолинит / слюда	Лабильные / слюда
				Слюды	Каолинит и хлорит	Лабильные		
Т11К маршевая перегнойно-квазиглеевая	H	0–7	Иловатый суглинок	58	25	17	0,4	0,3
	AYhq	7–13	Иловатый суглинок	66	22	12	0,3	0,2
	2BMq	13–32	Тяжелый суглинок	41	17	42	0,4	1,0
	3BCq	32–38	Песок	44	12	44	0,3	1,0
Т17К маршевая гумусово-глеевая	AYg	0–10	Супесь	33	20	47	0,6	1,4
	2AYBMg	10–26	Тяжелый суглинок	33	21	46	0,6	1,4
	2BMCg	26–55	Тяжелый суглинок	43	28	29	0,7	0,7
	3Cg	55–70	Ленточная глина	41	28	31	0,7	0,8
Т20К маршевая гумусово-глеевая	AY/BMg	7–40	Тяжелый суглинок	54	14	31	0,3	0,6
	2Cg	40–50	Супесь	24	9	67	0,4	2,8
	Dg	50–75	Тяжелый суглинок	46	11	43	0,2	0,9

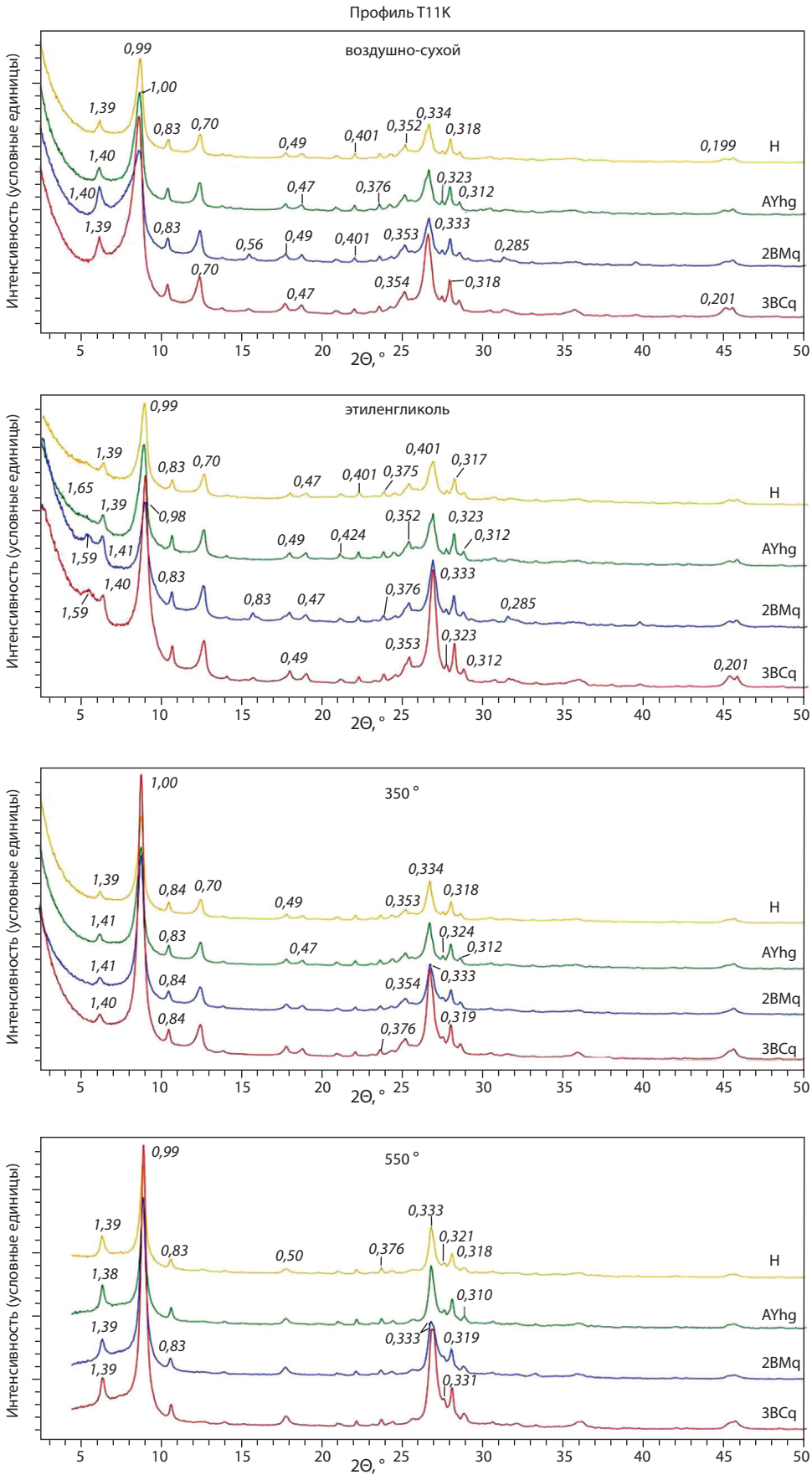

Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы илистых фракций из разреза T11K (маршевая перегнойно-квазиглеевая почва)

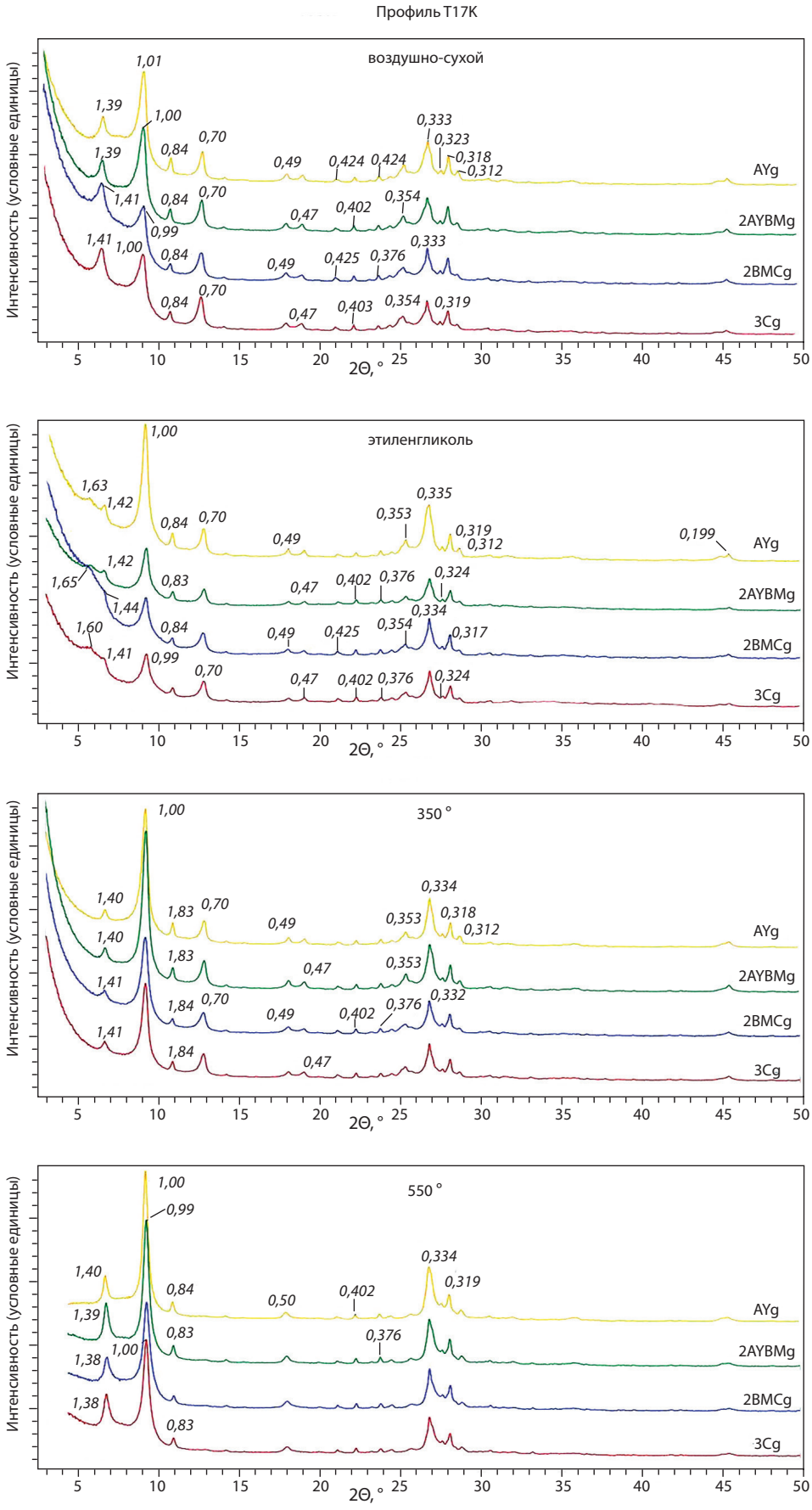

Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы илистых фракций из разреза T17K (маршевая гумусово-глеевая почва)

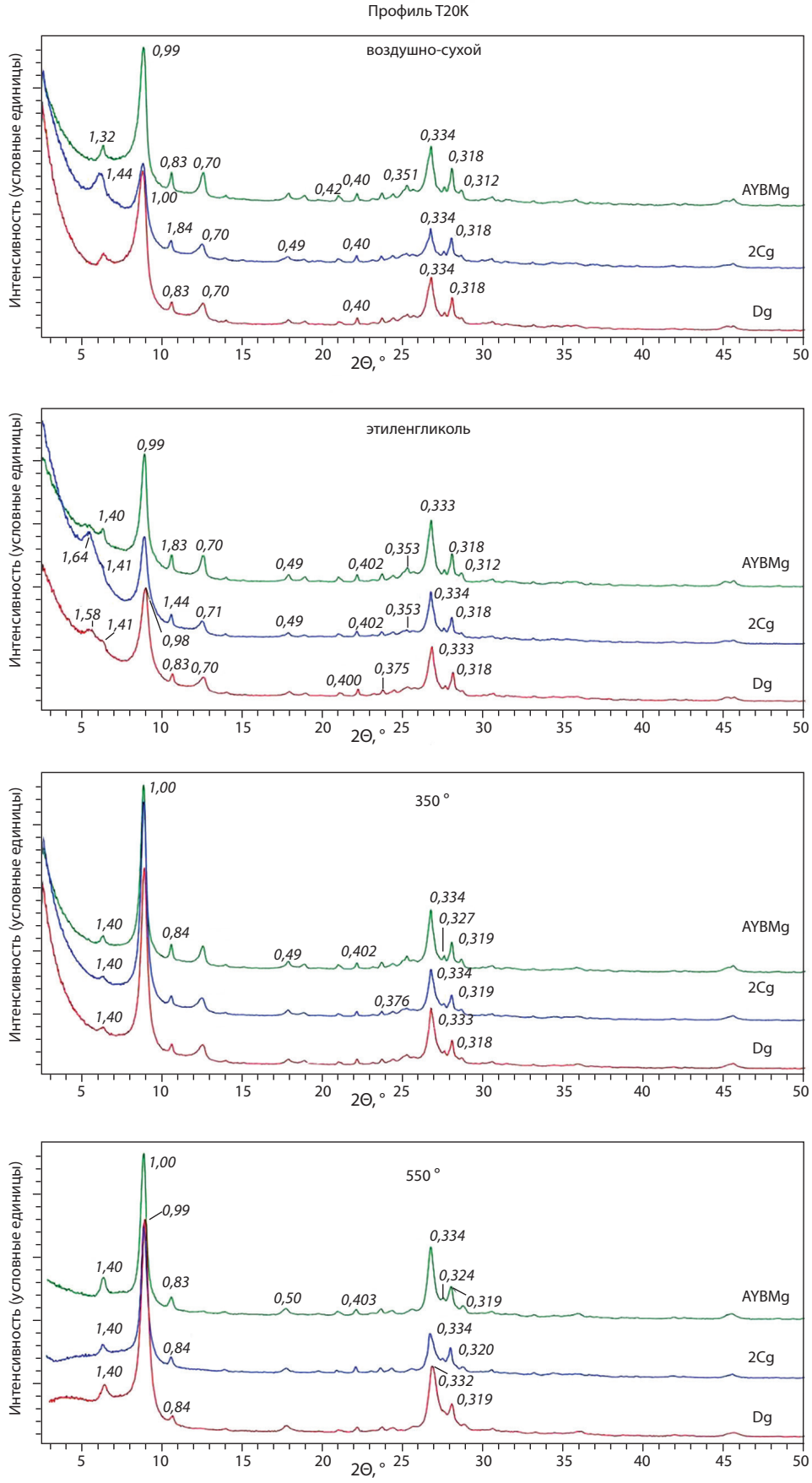

Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы илистых фракций из разреза Т20К (маршевая гумусово-глеевая почва)

Обсуждение

Источники материала почвообразуюших пород маршевых почв. В ряде работ маршевое почвообразование рассматривается как синлитогенное, поскольку приливно-отливная зона характеризуется постоянной аккумуляцией и денудацией отложений (Tseits, Dobrynin, 2005; Tseits, Marechek, 2021). Это подразумевает, что почвообразующие породы по определению имеют минералогический состав, преимущественно определяемый источником материала. При этом обычно состав водноледниковых, озерных и аллювиальных отложений существенно варьирует в пространстве, хотя, казалось бы, при транспорте осадков можно предположить их перемешивание и усреднение по составу. Однако условия осадконакопления, площадь, с которой они собираются, и прочие факторы могут существенно менять состав подобных пород и почв, что показывают и примеры из региона, где проводились исследования. В частности, озерно-ледниковые осадки озера Исаево на Заонежском полуострове Онежского озера включали прослои с разным соотношением содержаний хлорита и иллита (Демидов, Красильников, 1997): содержание хлорита возрастало в периоды более сухого климата, когда осадки собирались с меньшего водосбора, который был сложен породами основного состава и их дериватами. В более влажные годы водосбор был больше, включал более распространенные в регионе гранито-гнейсы, и в осадках возрастало содержание иллита.

Очевидно, что материалом для осадков приливно-отливной зоны является терригенный материал, приносимый в море водными потоками. Эоловый привнос служит источником минерального материала маршевых почв в меньшей степени в силу того, что в таежной зоне почвенная поверхность покрыта лесной подстилкой. Для минеральных взвесей в воде Белого моря было показано, что преобладающим глинистым минералом в них был иллит, несколько уступали ему каолинит и хлорит, реже встречался смектит и еще реже — смешаннослойный иллит-смектит (Кравчишина, Дара, 2014). Довольно широкий спектр минералов, которые встречаются во взвесях, не вполне соответствует представлениям о том, что состав отложений и почв Восточной Фенноскандии в основном содержит слюды и в меньшей степени хлориты. Однако надо понимать, что довольно большой вклад вносят и реки, собирающие материал водосборов на других геологических структурах, например Северная Двина (Кравчишина, Дара, 2014). Кроме того, и в Фенноскандии в составе глинистого материала встречаются разнообразные минералы как гипергенного, так и гидротермального происхождения. Например, в илистой фракции почв на аллювиальных наносах реки Оланги в Северной Карелии был обнаружен каолинит (Красильников, 1995); его присутствие было приписано влиянию остатков древних кор выветривания, которые встречаются в гористых северных районах Фенноскандии. Продукты гидротермального преобразования и последующего выветривания основных пород на Карельском берегу Белого моря включали серпентин, тальк, железистый хлорит и нонтронит (Красильников и др., 1999). Таким образом, состав глинистых минералов взвесей и, соответственно, береговых отложений на побережье Белого моря вполне закономерен.

Пространственная неоднородность глинистых минералов почв томболо. Данные рентген-дифрактометрии показывают существенные колебания в количественном составе глинистых минералов в почве при едином качественном составе. Последний вполне соотносится с литературными данными по составу взвесей в Белом море (Кравчишина, Дара, 2014). На разных по уровню элементах марша доля слюдоподобных минералов колеблется. Больше всего их в верхних горизонтах разреза T11K, который находится у самого уреза воды. Очевидно, это связано со свежестью отложений. В нижних горизонтах того же разреза присутствуют в значительных количествах разбухающие минералы или смектитовые слои в смешаннослойных минералах. Вероятно, эти отложения сформировались раньше, чем верхние 13 см почвы. Мы только отчасти склонны приписывать особенности минералогического состава нижних горизонтов разнице в осадконакоплении, поскольку горизонты 2BMq и 3BCq существенно отличаются по гранулометрическому составу при близком количественном соотношении минералов.

Разрез T17K, который находится на среднем марше, характеризуется следующей последовательностью отложений: внизу залегают ленточные глины, поверх которых находятся суглинки, перекрытые тонким супесчаным слоем. Ленточные глины — типичные озерно-ледниковые отложения, которые сформировались, скорее всего, в дриасе и пребореале, а перекрывающие их суглинки, очевидно, связаны с резким повышением уровня Белого моря в конце пребореала — начале бореала около 10 тыс. лет назад (Колька и др., 2018). Соответственно, супеси связаны с близким к современности формированием береговой линии томболо. Так же, как и в разрезе T11K, обращает на себя внимание сходство в количественном соотношении состава глинистых минералов в верхних двух горизонтах, которые вложены в разновозрастные отложения, отличающиеся по гранулометрическому составу.

В разрезе T20K, который находится в середине томболо в районе «соленых луж», супесчаный прослой между двумя суглинистыми горизонтами отличается как от верхнего, так и от нижнего горизонтов очень высоким содержанием разбухающих

минералов, чуть ли не втрое превышающим количество слюдистых минералов в илистой фракции. Неоднородность отложений связана со сложной историей формирования томболо, однако имеет смысл отметить, что все отложения легкого гранулометрического состава имеют высокое содержание смектитов или смектитовых пакетов в смешанослойных минералах. Связать этот феномен исключительно с определенными источниками осадков сложно, потому что по характеру залегания в разрезе очевидно, что отложения эти разновозрастные.

Трансформация минералов при почвообразовании. На первый взгляд количественное распределение минералов в профилях исследованных почв хаотично и не поддается интерпретации с точки зрения педогенеза. Однако определенную логику можно предположить, если исходить из гипотезы, что смектиты или смектитовые слои в смешанослойных минералах формируются в результате деградационной трансформации хлоритов и, возможно, слюдистых минералов в тех зонах, где идут активные окислительные процессы. Ранее отмечалось, что в маршевых почвах активная трансформация минералов происходит именно при переходе почвы в режим аэрации (Mathé et al., 2007). В нашем случае, очевидно, подключаются и процессы гидролиза в условиях подкисления среды в результате выделения серной кислоты; ранее слабо выраженный процесс окисления сульфидов выделялся в исследованных почвах по ряду косвенных признаков (Bagdasarov et al., 2024a). Ранее было показано, что при высоком содержании сульфидов выделяются большие количества сильной серной кислоты, которые приводят к разрушению кристаллической решетки глинистых минералов, но при относительно низком содержании сульфидов концентрация кислоты низкая, что ведет к интенсификации трансформационной деградации глинистых минералов (Красильников, Шоба, 1997). С этой точки зрения профиль Т11К на урезе воды подвергается воздействию периодического подкисления и потому содержит относительно много смектитовых слоев, за исключением совсем свежих наносов. В верхних горизонтах разреза Т17К на среднем марше в верхних двух горизонтах идет более активное окисление, чем в разрезе Т11К, что выражается в более высоких пропорциях смектитовой составляющей. Нижние горизонты практически постоянно затоплены, потому гидролиз там не идет. Наконец, в разрезе Т20К, находящемся в зоне застоя влаги, окислительная обстановка периодически наблюдается в супесчаном горизонте, где имеется периодическая аэрация. Исходя из этих соображений, можно предположить, что в исследованных почвах в окислительных условиях происходит деградационная трансформация слюд и хлоритов с формированием смешанослойных минералов со смектитовыми слоями, как это описывалось ранее для отчасти сходных с нашими объектов (De Arambarri and Talibudeen, 1987; Velde and Church, 1999).

Заключение

В ходе исследований маршевых почв приливно-отливной зоны на Поморском берегу Белого моря была установлена большая гетерогенность отложений, которые формировали разнообразные комбинации прослоев разного гранулометрического состава, что связано со сложной историей формирования Белого моря и его береговой линии. Исследование минералогического состава илистой фракции почв, находящихся на разных уровнях марша, показало единство состава глин: слюдистые минералы (иллиты), каолинит, хлорит и смешанослойные иллит-вермикулит и хлорит-смектит. Эти сведения соответствуют литературным данным по составу взвесей в воде Белого моря. При анализе количественного соотношения глинистых минералов мы пришли к выводу, что он определяется как составом отложений, так и почвенным выветриванием минералов, что подтверждает идею Т.А. Соколовой о сложном характере формирования минералогического состава глин в почвах на отложениях, переотложенных водой. Основным процессом выветривания в маршевых почвах была деградационная трансформация хлорита и, возможно, слюды с образованием смектитовых слоев. Эти процессы пространственно связаны с зонами аэрации маршевых почв, хотя бы периодически находящихся в окислительном режиме.

Информация о финансировании работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-67-10006 «Запасы и динамика “голубого углерода” в береговой зоне морей западного сектора Российской Арктики». Определение минерального состава илистой фракции проведено на дифрактометре MiniFlex 600 Rigaku, приобретенном МГУ имени М.В. Ломоносова в рамках федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» национального проекта «Наука».

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Багдасаров И.Е., Цейц М.А., Крюкова Ю.А. и др.* Сравнительная характеристика почвенного и растительного покрова томболо побережий Белого и Балтийского морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2023. № 1. https://dx.doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-3-15

2. *Гагарина Э.И., Соколова Т.А., Сухачёва Е.Ю.* Глинистые минералы в слабооподзоленных почвах абрадированных моренных равнин Северо-Запада России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 4.

3. *Горбунов Н.И.* Минералогия и коллоидная химия почв. М., 1974.

4. *Демидов И.Н., Красильников П.В.* Состав и условия формирования глинистых донных отложений оз. Исаево на Заонежском п-ве // Геология, петрография и геохимия докембрийских образований Карелии / Под ред. А.И. Голубева. Петрозаводск, 1997.

5. *Колька В.В., Корсакова О.П., Лаврова Н.Б. и др.* Стратиграфия донных осадков малых озер и палеогеография западного берега Онежского залива Белого моря в позднеледниковье и голоцене // Геоморфология. 2018. № 2. https://dx.doi.org/10.7868/S0435428118020049

6. *Кравчишина М.Д., Дара О.М.* Минеральный состав взвеси Белого моря // Океанология. 2014. Т. 54, № 3. https://dx.doi.org/10.7868/S0030157414020129

7. *Красильников П.В.* Постантропогенная эволюция почв национального парка «Паанаярви» / Под ред. Ю.Й. Сыстра. Природа и экосистемы национального парка «Паанаярви». Петрозаводск, 1995.

8. *Красильников П.В., Седов С.Н., Гракина Е.Р.* Разрушение эндогенных слоистых силикатов в почвах на элювии основных пород в Северной Карелии // Почвоведение. 1999. № 4.

9. *Красильников П.В., Шоба С.А.* Сульфатнокислые почвы Восточной Фенноскандии. Петрозаводск, 1997.

10. *Соколова Т.А.* Глинистые минералы в почвах гумидных областей СССР. Новосибирск, 1985.

11. *Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И.* Глинистые минералы в почвах. Тула, 2005.

12. *Соколова Т.А.* Разрушение глинистых минералов в модельных опытах и в почвах: возможные механизмы, скорость, диагностика (анализ литературы) // Почвоведение. 2013. № 2. https://dx.doi.org/10.7868/S0032180X13020135

13. *Соколова Т.А., Толпешта И.И., Русакова Е.С. и др.* Глинистые минералы в почвах пойм ручьев в ненарушенных ландшафтах южной тайги (на примере почв ЦЛГПБЗ) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2013. № 4.

14. *Толпешта И.И., Соколова Т.А.* Трансформационные изменения слоистых силикатов в почвах бореального и суббореального поясов (анализ литературы) // Почвоведение. 2013. № 9. https://dx.doi.org/10.7868/S0032180X13090116

15. *Andrade G.R., Cuadros J., Partiti C.S. et al.* Sequential mineral transformation from kaolinite to Fe-illite in two Brazilian mangrove soils // Geoderma. 2018. Vol. 309. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.042

16. *Bagdasarov I.E., Konyushkova M.V., Kryukova Y.A. et al.* Trace elements in marsh soils of the Pomor coast of the White Sea // Eurasian Soil Science. 2024a. Vol. 57(8). https://dx.doi.org/10.1134/S1064229324600817

17. *Bagdasarov I., Tseits M., Kryukova I. et al.* Carbon stock in coastal ecosystems of tombolos of the White and Baltic seas // Land. 2024b. Vol. 13. https://dx.doi.org/10.3390/land13010049

18. *Coultas C.L., Calhoun F.G.* Properties of some tidal marsh soils of Florida // Soil Sci. Society Amer. J. 1976. Vol. 40, № 1. https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000010022x

19. *De Arambarri P., Talibudeen O.* Changes in the mineralogy of a cultivated marsh soil caused by simulated weathering // J. Soil Science. 1987. Vol. 38, № 1. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1987.tb02118.x

20. *Hathaway J.C.* Regional clay mineral fades in estuaries and continental margin of the United States east coast. P. 293-316. In: Environmental Framework of Coastal Plain Estuaries / Ed. B.W. Nelson. Geological Society of America, 1972. https://doi.org/10.1130/MEM133-p293

21. *He C., Bartholdy J., Christiansen C.* Clay mineralogy, grain size distribution and their correlations with trace metals in the salt marsh sediments of the Skallingen barrier spit, Danish Wadden Sea // Environmental Earth Sciences. 2012. Vol. 67. https://doi.org/10.1007/s12665-012-1536-z

22. *IUSS Working Group WRB.* World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. IUSS, Viena, Austria, 2014.

23. *Ma C., Chen J., Zhou Y. et al.* Clay minerals in the major Chinese coastal estuaries and their provenance implications // Frontiers of Earth Science in China. 2010. Vol. 4. https://doi.org/10.1007/s11707-010-0130-5

24. *Mathé V., Meunier A., Leveque F.* Anthropic acceleration of a natural clay mineral reaction in marshland soils (Atlantic Coast, France) // Clay Minerals. 2007. Vol. 42, № 1. https://doi.org/10.1180/claymin.2007.042.1.01

25. *Rodríguez-Ramírez A., Pérez-Asensio J.N., Villarías-Robles J.J.R.* Geomorphological and morpho-sedimentary features of a sand barrier in a tectonically asymmetrical estuary during the Late Holocene: La Algaida (SW Spain) // Geomorphology. 2023. Vol. 432. 108711. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108711

26. *Souza-Júnior V.S.D., Vidal-Torrado P., Garcia-Gonzaléz M.T., Otero X.L., Macías F.* Soil mineralogy of mangrove forests from the state of São Paulo, southeastern Brazil // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. Vol. 72. https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0197

27. *Tseits M.A., Dobrynin D.V.* Classification of marsh soils in Russia // Eurasian Soil Science. 2005. Vol. 38(1).

28. *Tseits M.A., Marechek M.S.* The formation of soil cover patterns on tidal marshes of the Arctic of Russia // Moscow University Soil Science Bulletin. 2021. Vol. 76, № 5.

29. *Velde B., Church T.* Rapid clay transformations in Delaware salt marshes // Applied Geochemistry. 1999. Vol. 14, № 5. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00092-4

Поступила в редакцию 21.10.2014
После доработки 15.11.2024
Принята к публикации 20.11.2024

MINERALOGICAL COMPOSITION OF THE CLAY FRACTION OF MARSH SOILS OF THE POMORSKY COAST OF THE WHITE SEA

N. V. Agadzhanova, E. I. Bagdasarov, Yu. A. Kryukova, P. V. Krasilnikov

The mineralogical composition of the silt fraction of marshes soils on the tombolo, a bridge between the mainland and a small island on the Pomorsky coast of the White Sea, has been studied. The soils on different parts of the marshes are characterized by different sequences of sediments and soil horizons embedded in them. Mica minerals ("illites"), kaolinite, chlorite and mixed-layer illite-vermiculite and chlorite-smectite were present in the silt fraction of all soils. Variation of mineralogical composition of clays was noted both between soil horizons and between the studied profiles. In our opinion, the variation is determined both by sediment composition and soil weathering of minerals, which confirms the idea of T.A. Sokolova about the complex character of formation of mineralogical composition of clays in soils on sediments re-deposited by water. The main weathering process in marsh soils was the degradation transformation of chlorite and, possibly, mica with the formation of smectite packages. These processes are spatially associated with the aeration zones of the marsh soils, at least periodically under oxidative regime.

Key words: clay mineralogy, synlithogenic soils, taiga zone soils, illite, smectite, mixed-layer minerals.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Агаджанова Нелли Владимировна, инженер 1 категории кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: neonilla_23@mail.ru

Багдасаров Илья Егорович, аспирант кафедры общего почвоведения факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: ilya5283@yandex.ru

Крюкова Юлия Александровна, мл. науч. сотр. кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: julango@mail.ru

Красильников Павел Владимирович, докт. биол. наук, и.о. декана, заведующий кафедрой общего почвоведения факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
ORCID (https://orcid.org/ 0000-0001-7084-9972)
e-mail: krasilnikov@soil.msu.ru

© Agadzhanova N.V., Bagdasarov E.I., Kryukova Yu.A., Krasilnikov P.V., 2025