

МИНЕРАЛОГИЯ И МИКРОМОРФОЛОГИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

КИСЛОТНО-ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И СОСТАВ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В РИЗОСФЕРЕ КЛЕНА ОСТРОЛИСТНОГО И ЕЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ В ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2019 г. Т. А. Соколова¹, *, И. И. Толпешта¹, И. В. Данилин¹, Ю. Г. Изосимова¹, Т. С. Чалова¹¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

*e-mail: sokolt65@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2018 г.

После доработки 03.10.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

В образцах, взятых в пятикратной повторности из горизонта АЕЛао подзолистой почвы из ризосферы клена (*Acer platanoides*) и ели обыкновенной (*Picea abies*) и из соответствующих вмещающих почв, определяли кислотно-основные характеристики и содержание и минералогический состав илистой фракции. На участке под еловым древостоем и ризосфера, и вмещающая почва имеют более низкие значения рН, чем на участке под кленами. При этом значения рН в ризосфере ели достоверно ниже, чем во вмещающей почве, а в ризосфере клена значимых различий между этими показателями не выявлено. Почва ризосферы обоих видов деревьев по сравнению с вмещающей почвой характеризуется достоверно большим содержанием слюд и иллитов в составе илистой фракции, что можно объяснить интенсификацией в ризосфере процессов физического дробления этих минералов, заключенных в составе более крупных фракций, и усилением процесса иллитизации. В почве ризосферы ели и во вмещающей почве под еловым лесом в составе илистой фракции содержится больше лабильных минералов и меньше каолинита, слюд и иллитов, чем в почве ризосферы клена и во вмещающей почве под кленовой парцеллой. Эти различия частично можно объяснить пространственной неоднородностью состава глинистого материала покровного суглинка, и частично — специфической функционирования разных древесных культур и связанного с ними микробного сообщества, определяющей более низкие значения рН в почве под еловым древостоем. Почва ризосферы клена по сравнению с вмещающей почвой характеризуется большей стадией хлоритизации минералов группы почвенных хлоритов вследствие благоприятных для этого процесса кислотно-основных условий. В почве ризосферы ели по сравнению с вмещающей почвой выявлена тенденция к более глубокой трансформации слюд и иллитов в лабильные структуры за счет более кислой реакции среды, способствующей мобилизации Al.

Ключевые слова: почвенная кислотность, трансформация слоистых силикатов, почвенные хлориты, иллитизация, физическое дробление слюд и иллитов, Retisols

DOI: 10.1134/S0032180X1906011X

ВВЕДЕНИЕ

Анализ литературы показывает, что почва в ризосфере большинства древесных культур по многим показателям существенно отличается от вмещающей почвы, особенно в присутствии на корнях эктомикоризных грибов. Это связано с постоянным поступлением в ризосферу экссудатов корней, отмирающих и пограничных клеток и с активизацией процессов функционирования микробного сообщества. Поэтому ризосферу относят к “горячим” локасам (“hot spots”) почвы, где многие биохимические процессы протекают со значительно большей скоростью, чем во вмещающей почве [46].

В большинстве экспериментальных исследований в почве ризосферы многих древесных ви-

дов по сравнению с вмещающей почвой наблюдалась более кислая реакция среды [15, 22, 27, 35, 55, 61]. Но отмечены случаи, когда в ризосфере в отдельные периоды наблюдаются более высокие значения рН, чем во вмещающей почве, за счет поступления с корневыми экссудатами HCO_3^- , в ответ на преимущественное поглощение нитратов и других элементов питания в анионной форме по сравнению с катионной формой [60].

Почва ризосферы содержит больше $\text{C}_{\text{орг}}$, чем вмещающая почва, что объясняется поступлением в ризосферу органических веществ в виде экссудатов корней и продуктов метаболизма микроорганизмов, а также отмерших и пограничных клеток [22, 30, 31, 39–41, 61]. В почвенном растворе из ризосферы повышена общая концентрация

водорастворимого органического вещества и концентрация низкомолекулярных органических кислот (НМОК) в его составе [44, 55]. В местах скопления некоторых эктомикоризных грибов, продуцирующих НМОК, эти показатели могут превышать соответствующие величины во вмещающей почве на 1–3 порядка [41, 45].

Почва ризосферы имеет более высокие значения ЕКО за счет большего содержания органического вещества и в некоторых случаях за счет особенностей минералогического состава [22, 27, 61]. В ряде работ выявлено увеличение содержания обменного калия в почве и концентрации калия в почвенном растворе в ризосфере по сравнению с вмещающей почвой [26, 35, 50, 60, 61].

Повышенное содержание НМОК в сочетании с кислой реакцией среды создает необходимые условия для образования на поверхности частиц минералов протонированных комплексов и комплексов с участием органических лигандов, которые поляризуют и ослабляют связи катионов с остальной частью кристаллической решетки, способствуя растворению минерала [58]. Поэтому процесс выветривания и растворения минералов в ризосфере происходит с большей скоростью, чем во вмещающей почве [24]. В обзорной статье [29] и в ряде экспериментальных исследований [21, 25, 37, 52] показана большая роль эктомикоризных грибов в растворении минералов за счет выделения ими оксалат- и цитрат-ионов и других сильных комплексообразователей. Повышенная концентрация калия в почвенном растворе в ризосфере способствует развитию процесса иллитизации [26]. Влияние происходящих в ризосфере химических реакций на выветривание минералов усиливается за счет механического давления растущего корня на минеральные зерна, что приводит к изменению формы минеральных частиц и их физическому дроблению [20].

В серии экспериментальных работ по выветриванию минералов под разными древесными культурами в модельных полевых опытах Na-вермикулит помещали в разные горизонты подзолов, лювисолей и камбисолей¹ на срок от 6 месяцев до трех лет. За это время в межслоях тест-минерала сформировались устойчивые прослойки гидроксида Al [23, 53, 54] и наблюдалось соответствующее снижение ЕКО. Интенсивность процесса хлоритизации, по которой оценивали интенсивность процесса выветривания, под разными древесными культурами уменьшалась в ряду: *Picea abies*, *Abies alba* > *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* > *Quercus* spp., *Fagus sylvatica* [23].

В почве Naplic Podzol в Швеции в ризосфере ели (*Picea abies*) по сравнению с вмещающей почвой достоверно снижалось содержание смешанно-

слоистых иллит-вермикулитовых минералов, что авторы объясняют усилением процесса их растворения [28, 39]. Противоположные результаты, то есть накопление лабильных компонентов в ризосфере различных видов растений, были получены во многих модельных полевых и лабораторных экспериментах [18, 47, 43, 49, 63], а также в природных условиях [59]. Авторы объясняют эти результаты усиленной трансформацией в ризосфере слюд и хлоритов в лабильные структуры. В лювисолях Канады под *Picea glauca* × *engelmannii* (Moench.) Voss с микоризой наблюдалось увеличение количества лабильных минералов за счет трансформации слюд и иллитов по сравнению с почвами под такой же древесной растительностью, но без микоризы [38].

Такие противоречивые результаты можно объяснить различиями в минералогическом составе почв и пород, к которым относятся полученные данные. Если почва достаточно богата легковыветривающимися слоистыми силикатами, прежде всего, триоктаэдрическими слюдами и хлоритами, накопление лабильных минералов как продуктов их трансформации в ризосфере превышает потери лабильных минералов за счет растворения. В почвах, обедненных легковыветривающимися минералами, образование лабильных структур – продуктов трансформации – происходит с меньшей скоростью, чем процесс их растворения. Поэтому в ризосфере наблюдается уменьшение количества лабильных минералов по сравнению с вмещающей почвой. Таким образом, в ризосфере интенсифицируются наиболее важные процессы, участвующие в выветривании минералов – их растворение и трансформационные изменения.

Основная имеющаяся информация о различиях в химических свойствах и минералогическом составе между почвой ризосферы древесных пород и вмещающей почвой относится к экосистемам хвойных лесов бореального пояса. Значительно меньше известно об особенностях состава минералов в ризосфере почв под листовыми лесами, в частности под широколиственными породами.

В настоящей работе представлены результаты изучения глинистых минералов в ризосфере клена остролистного (*Acer platanoides*) и ели обыкновенной (*Picea abies*), проведен сравнительный анализ минералогического состава иллитовой фракции почвы в ризосфере этих пород и соответствующей вмещающей почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор образцов ризосферы и вмещающей подзолистой почвы осуществляли только из гор. АЕLao, поскольку в нижележащем гор. ЕL количество корней резко уменьшалось, а в вы-

¹ По тексту названия почв даны в авторской редакции.

шележащих органогенных горизонтах, густо пронизанных корнями деревьев, кустарников и травянистых растений, отделить почву ризосферы клена и ели трудно.

Гор. АЕLao, залегая непосредственно под подстилкой, является верхним минеральным горизонтом. Он имеет неоднородную окраску – на общем коричневатом-сером (во влажном состоянии) фоне выделяются осветленные пятна, занимающие от 10 до 40% площади среза. Горизонт характеризуется высоким содержанием $C_{орг}$, которое может составлять до 4–6% за счет присутствия “грубого гумуса” – не полностью разложившихся растительных остатков. Эти свойства дают основания индексировать горизонт как АЕLao.

Непосредственными объектами исследования были образцы гор. АЕLao из ризосферы клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и ели обыкновенной (*Picea abies*) и из соответствующих вмещающих палево-подзолистых почв Центрально-лесного заповедника (Тверская область), где эти почвы развиваются преимущественно под еловыми лесами в условиях относительно хорошего дренажа [11]. По классификации почв России 2004 г. [9] исследованные почвы относятся к подтипу палево-подзолистых почв в типе подзолистых почв в отделе текстурно-дифференцированных почв, по WRB 2007 [16] – к реферативной группе Альбелювисолей (Albeluvisols), по WRB 2014 [10] – к реферативной группе Ретисолей (Retisols).

На фоне преобладания еловых древостоев на палево-подзолистых почвах часто встречаются участки смешанного леса и парцеллы, в пределах которых господствует какая-либо лиственная порода деревьев, чаще других береза (*Betula pendula* Roth), осина (*Populus tremula* L.) и клен остролистный (*Acer platanoides* L.). Появление таких участков с преобладанием лиственных пород может быть следствием воздействия различных факторов. Широколиственные породы часто произрастают в местах с более близким залеганием карбонатной морены или на территориях, подвергшихся сильным ветровалам, приводящим к гибели елового древостоя и к улучшению освещенности.

На одном из таких участков с высокой долей (20–30%) в древесном ярусе клена остролистного 15–30-летнего возраста на площадке размером около 50 м² из гор. АЕLao палево-подзолистой почвы отобраны образцы из ризосферы клена и из вмещающей почвы в пятикратной повторности. Вторая площадка расположена на расстоянии ~25 м от первой на участке зрелого елового леса. Образцы из ризосферы ели и вмещающей почвы также отбирали из гор. АЕLao в пятикратной повторности с участка площадью около 15 м² под елями (*Picea abies*) 15–20-летнего возраста. Обе площадки расположены в одинаковых усло-

виях рельефа на пологом склоне юго-западной экспозиции. Почвы развиты на двучленных отложениях: легких покровных суглинках, подстилаемых тяжелосуглинистой мореной на глубине 40–50 см.

В напочвенном покрове участка елового леса большее участие принимают зеленые мхи (*Polytrichum commune* и др.), черника (*Vaccinium myrtillus*) и кислица (*Oxalis acetosella*) и меньшее неморальное разнотравье: зеленчук (*Galeobdolon luteum*), печеночница (*Hepatica nobilis*), майник (*Maianthemum bifolium*), седмичник европейский (*Trientalis europaea*), подмаренник белый (*Galium album* L.) и др. На участке под кленами доля неморальных травянистых видов в напочвенном покрове значительно больше. Профиль почвы на обоих участках состоит из одинакового набора генетических горизонтов L, F, АЕLao, EL, BD, но в почве под еловым древостоем в составе подстилки под гор. F формируется нижний органогенный гор. H, который в почве под кленами отсутствует.

Образцы из ризосферы отбирали следующим образом. Вначале из гор. АЕLao брали общий образец, и из него извлекали корни с прилипшей почвой. После встряхивания на корнях оставалось некоторое количество почвенного материала (почвенные “бусы” диаметром <5 мм), который рассматривали как почву ризосферы. Осыпавшуюся при встряхивании почву рассматривали как вмещающую. Выделение илстой фракции проводили методом отмучивания без предварительной химической обработки [1]. Суспензии коагулировали раствором 1 М CaCl₂ и отмывали от избытка хлорид-иона диализом против дистиллированной воды. Содержание илстой фракции определяли по результатам отмучивания.

Минералогический состав тонких фракций определяли методом рентген-дифрактометрии. Дифракционные картины от ориентированных препаратов получали на приборе ДРОН-3 в режиме: CuK_α-излучение, фильтрованное Ni, напряжение и сила тока в трубке 35 кВ и 20 мА. Идентификацию глинистых минералов проводили по принципам, изложенным в соответствующих руководствах [12, 14, 36, 48]. Содержание отдельных групп глинистых минералов рассчитывали по модифицированному методу Корнблюма [14]. Значения рН определяли потенциометрически при разбавлении 1 : 2.5 иономером SevenGoPro (Mettler Toledo), $C_{орг}$ – по Тюрину с титриметрическим окончанием, обменные основания – в вытяжке NH₄Cl, обменную кислотность – по Соколову [5]. Степень насыщенности ППК рассчитывали как долю обменной кислотности от ЕКО эффективной.

Статистическую обработку результатов проводили в пакетах программ R и Statistica. Использовали приемы непараметрической статистики, по-

Таблица 1. Некоторые химические свойства ризосферы и вмещающей почвы двух участков, медианные значения ($n = 5$) (при составлении таблицы были использованы данные [15])

Образец	рН		$C_{орг}$, %	Обменная кислотность, смоль(экв)/кг	Насыщенность ППК, %
	H ₂ O	KCl			
Кленовая парцелла					
Ризосфера	4.50	3.47	5.20*	2.96*	40.9*
Вмещающая почва	4.48	3.44	4.20	3.23	31.5
Еловый лес					
Ризосфера	3.91*	3.20*	4.70*	2.58*	54.7*
Вмещающая почва	4.12	3.35	2.51	1.78	71.6

* Различия между ризосферой и вмещающей почвой достоверны при $P > 0.9$.

скольку для многих показателей распределение случайных величин отличалось от нормального. Сравнивали медианные значения признаков, значимость различий оценивали по непараметрическому критерию Вилкоксона [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кислотно-основные характеристики гор. АЕЛао почв под кленовой парцеллой и под еловым лесом. Полная химическая характеристика профилей палево-подзолистых почв по горизонтам на площадках под еловым лесом и под кленовой парцеллой, а также химическая характеристика образцов из ризосферы и вмещающей почвы опубликованы ранее [6, 15, 17]. Поэтому в табл. 1 представлены только некоторые кислотно-основные характеристики ризосферы и вмещающей почвы и содержание в них $C_{орг}$, которое достоверно выше в ризосфере и клена, и ели по сравнению с вмещающей почвой.

Из табл. 1 видно, что на площадке под еловым лесом наблюдаются более низкие значения pH_{H_2O} и pH_{KCl} и в ризосфере, и во вмещающей почве, чем на площадке под кленовой парцеллой, что согласуется с литературными данными. Установлено, что при прочих равных условиях почвы под хвойными культурами в подстилке и верхних минеральных горизонтах характеризуются более кислой реакцией среды и большей подвижностью алюминия по сравнению с почвами под лиственными, особенно под широколиственными, породами [7, 19, 33, 34, 42, 45, 56]. В работе [23] показано, что ель обыкновенная (*Picea abies*) по сравнению с кленом остролистным (*Acer platanoides*) обладает значительно более сильным подкисляющим воздействием на почву.

Сравнительный анализ содержания и состава водорастворимого органического вещества в почвах под разными древостоями показал, что концентрация растворенного органического вещества под хвойной культурой (*Tsuga canadensis*) в

2.5 раза выше, чем в почвах под двумя видами клена (*Acer saccharum* и *Acer rubrum*). При этом концентрация наиболее сильнокислотных компонентов в растворенном органическом веществе почвы под *Tsuga canadensis* составила 236 мкмоль/л, в то время как под *Acer saccharum* сильнокислотные компоненты отсутствовали, а под *Acer rubrum* их концентрация составила 21 мкмоль/л [33].

Несмотря на более высокие значения рН, в почве на участке под кленами обменная кислотность оказалась больше, особенно во вмещающей почве, а степень насыщенности ППК — меньше, чем в почве под елью. Такие противоречивые данные могут быть связаны с наличием в почве под еловым древостоем наиболее сильных органических кислот: щавелевой и лимонной, которые продуцируются эктомикоризными грибами, обычно обитающими на корнях ели, и обуславливают низкие значения рН. Кроме того, содержание органического вещества в ризосфере клена и во вмещающей почве оказалось выше, чем в ризосфере ели и в соответствующей вмещающей почве, что могло способствовать увеличению обменной кислотности.

Под еловым лесом почва ризосферы по сравнению с вмещающей почвой характеризуется достоверно более низкими значениями pH_{H_2O} и pH_{KCl} , большей обменной кислотностью и меньшей степенью насыщенности основаниями. В почве под кленовой парцеллой наблюдаются противоположные закономерности: ризосфера характеризуется достоверно меньшей обменной кислотностью и большей насыщенностью основаниями, при этом значимых различий в величинах pH_{H_2O} и pH_{KCl} между ризосферой и вмещающей почвой нет.

Выявленные различия в кислотно-основных свойствах ризосферы и вмещающей почвы под елью и под кленом можно объяснить совокупным действием нескольких факторов. Во-первых, на корнях ели, как правило, развиваются эктомикоризные грибы, продуцирующие наиболее сильные органические кислоты, что приводит к под-

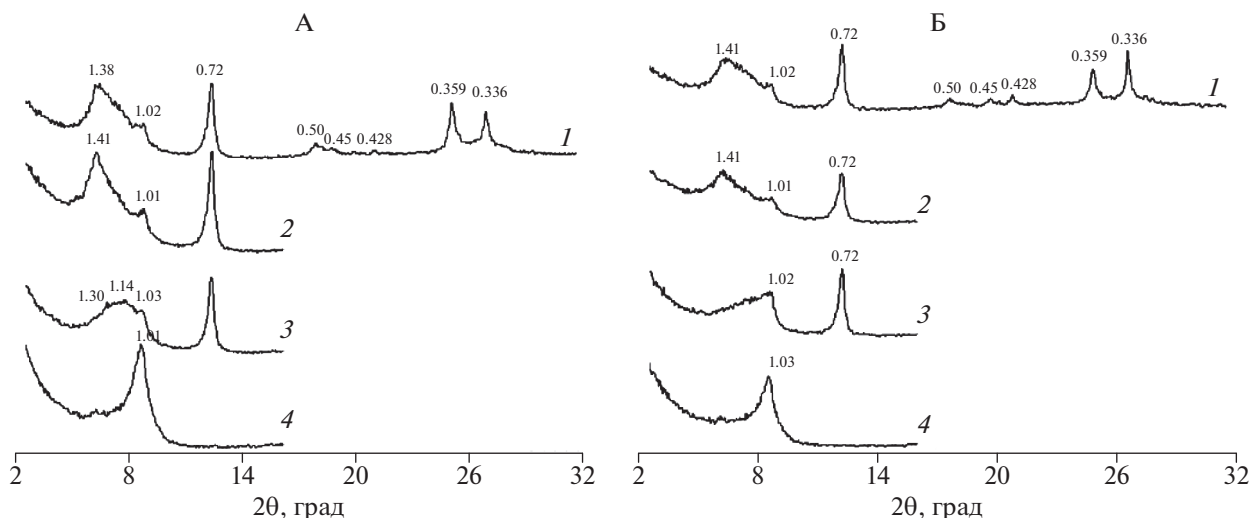


Рис. 1. Рентген-дифрактограммы препаратов насыщенной Са илистой фракции гор. АЕЛао ризосферы клена (А) и вмещающей почвы (Б): исходных (1), насыщенных этиленгликолем (2), прокаленных при 350°C (3) и 550°C (4).

кислению почвы в ризосфере. В обзорной статье [29] представлен список семейств растений, представители которых имеют на корнях эктомикоризу. В этом списке на первом месте стоит семейство сосновых (Pinaceae), к которому относится *Picea abies*, а семейство кленовых (Aceraceae) отсутствует. Во-вторых, с опадом клена на поверхность почвы поступает больше оснований, чем с еловым опадом. Установлено, что в хвое, ветвях, древесине и опаде ели содержится меньше Са, Mg и К, чем в соответствующих компонентах широколиственных видов древесных пород [13]. Последняя закономерность частично связана с тем, что у многих широколиственных видов, включая клен, более глубокая корневая система, чем у ели, и поэтому деревья способны извлекать основания – элементы питания (Са, Mg, К) с большей глубины, чем корни ели, и возвращать их на поверхность и в верхние горизонты. В силу указанных причин в ризосфере клена по сравнению с вмещающей почвой не только не наблюдается подкисления среды, но и снижается обменная кислотность и соответственно повышается насыщенность ППК.

Содержание и минералогический состав илистой фракции в ризосфере клена остролистного и во вмещающей почве. В содержании илистой фракции статистически значимых различий между ризосферой и вмещающей почвой не выявлено при $P > 0.7$. В составе илстых фракций образцов во всех повторностях, как из ризосферы, так и из вмещающей почвы, диагностированы каолинит, иллит, минералы группы почвенных хлоритов и смешанослойные минералы с участием иллитовых и лабильных слоев, которые представлены вермикулитовыми и, возможно, смектитовыми компонентами. Преобладающей фазой является

каолинит, на долю которого в сумме с хлоритом приходится $>70\%$. При этом в сумме каолинита и хлорита, количество которых по использованной методике определяется совместно, явно преобладает каолинит – об этом свидетельствует низкая интенсивность рефлекса хлорита в области 1.4 нм после прокалывания при 550°C (рис. 1). Вероятно также присутствие собственно слюд и слюд с дефицитом калия, но при наличии большого количества иллитов отдельная идентификация этих минералов не всегда возможна. Не исключено присутствие вермикулита как самостоятельной фазы, но его однозначная диагностика требует проведения специальных исследований. В небольшом количестве присутствуют хлорит и кварц, в некоторых образцах – полевые шпаты. Как в ризосфере, так и во вмещающей почве, отношение рефлексов первого и второго порядка слюд и иллитов варьируют в пределах от 2.0 до 2.3, что подтверждает диоктаэдрический характер заполнения октаэдрических сеток.

Указанная ассоциация глинистых минералов типична для гор. АЕЛао подзолистых почв, в частности, палево-подзолистых почв Центрально-лесного заповедника [2, 8, 17].

Анализ дифракционных картин и статистическая обработка материала позволили выявить два отличия минералогического состава илистой фракции ризосферы клена от соответствующих характеристик илистой фракции вмещающей почвы. Первое отличие заключается в том, что в почве ризосферы содержится достоверно (при $P > 0.9$) больше слюд и иллитов и достоверно меньше (при $P > 0.9$) лабильных минералов при незначимых различиях в количестве минералов группы каолинита (табл. 2).

Таблица 2. Содержание и минералогический состав илистой фракции ризосферы и вмещающей почвы двух участков, медианные значения ($n = 5$)

Образец	Содержание частиц <1 мкм, %	Иллит	Каолинит и хлорит	Лабильные минералы	Хлорит	Почвенный хлорит
		% от суммы трех компонентов			полуколичественная оценка	
Кленовая парцелла						
Ризосфера	4.6	22*	73	5*	+	+++
Вмещающая почва	6.9	20	70	9	+	++
Еловый лес						
Ризосфера	4.1*	32*	51	17	+	++
Вмещающая почва	3.6	30	53	17	+	++

* Различия между ризосферой и вмещающей почвой достоверны при $P > 0.9$.

Как уже отмечалось, аккумуляция иллитовых минералов в почвах в составе глинистого материала ризосферы может быть связана с совместным влиянием нескольких факторов. Можно предположить, что наибольшую роль играют усиление в ризосфере процессов физического дробления слюды и иллитов, заключенных в составе более крупных фракций [20], а также интенсификация процесса иллитизации, особенно в отдельные сезоны года [26, 60, 62]. Последнему процессу способствует более высокая концентрация калия в почвенном растворе, которая часто наблюдается в ризосфере различных видов растений по сравнению с вмещающей почвой [32, 61], несмотря на интенсивное поглощение калия корнями растений.

Второе отличие между глинистым материалом почвы ризосферы и вмещающей почвы заключается в разной степени развития процесса хлоритизации почвенных хлоритов (табл. 2). Эти различия отчетливо проявляются при оценке степени сжатия решетки на рентгенограммах препаратов, прокаленных при 350°C (рис. 1, 2). На рентгенограммах образцов илистой фракции почвы ризосферы в четырех из пяти повторностей наблюдается отчетливый широкий максимум в области 1.0–1.3 нм, что позволяет отнести почвенные хлориты к средней и наиболее продвинутой стадиям хлоритизации. Только в одной повторности из пяти дифракционная картина почвенных хлоритов соответствует начальной стадии хлоритизации, при которой эти минералы дают лишь заметную асимметрию отражения 1.0 нм [14]. На рентгенограммах илстых фракций из вмещающей почвы картина обратная: отчетливый максимум в области 1.0–1.3 нм наблюдается только в одной повторности из пяти, в остальных случаях степень хлоритизации меньше и диагностируется по асимметрии максимума 1.0 нм, что соответствует начальной стадии хлоритизации.

В соответствии с большим содержанием иллитов и большей степенью хлоритизации поч-

венных хлоритов, то есть с большим количеством жестких структур, илстая фракция почвы ризосферы обеднена лабильными минералами по сравнению с вмещающей почвой (различия достоверны при $P > 0.9$).

Полученные результаты не согласуются с данными большинства авторов, которые наблюдали в ризосфере накопление лабильных минералов вследствие усиления процессов трансформационных изменений слюды, иллитов и хлоритов под действием органических лигандов и во многих случаях — под влиянием более кислой реакции среды [18, 43, 47, 49, 59, 63]. Выявленное противоречие между полученными данными и результатами других исследований можно объяснить следующим образом. В ризосфере клена остролистного медианные значения pH_{H_2O} ($n = 5$) по двум разным годам наблюдений (данные не приводятся) варьируют от 4.50 до 4.89, причем не наблюдается снижения значений pH водной и солевой суспензий по сравнению с вмещающей почвой, в которой эти величины варьируют от 4.11 до 4.69. Более того, в ризосфере величина обменной кислотности достоверно ниже, а степень насыщенности ППК — выше, чем во вмещающей почве. Указанные кислотно-основные характеристики ризосферы клена более благоприятны для развития процесса хлоритизации, чем значительно более низкие значения pH [17], свойственные ризосфере ели.

Содержание и минералогический состав илистой фракции в ризосфере ели обыкновенной и во вмещающей почве. Медианные значения содержания частиц <1 мкм составили 4.1 и 3.6% в ризосфере и вмещающей почве соответственно, различия значимы при $P > 95\%$. Набор глинистых минералов в илистой фракции в почве под еловым древостоем, так же как и под кленовой парцеллой, включает каолинит, иллит, минералы группы почвенных хлоритов и смешанослойные минералы с участием ил-

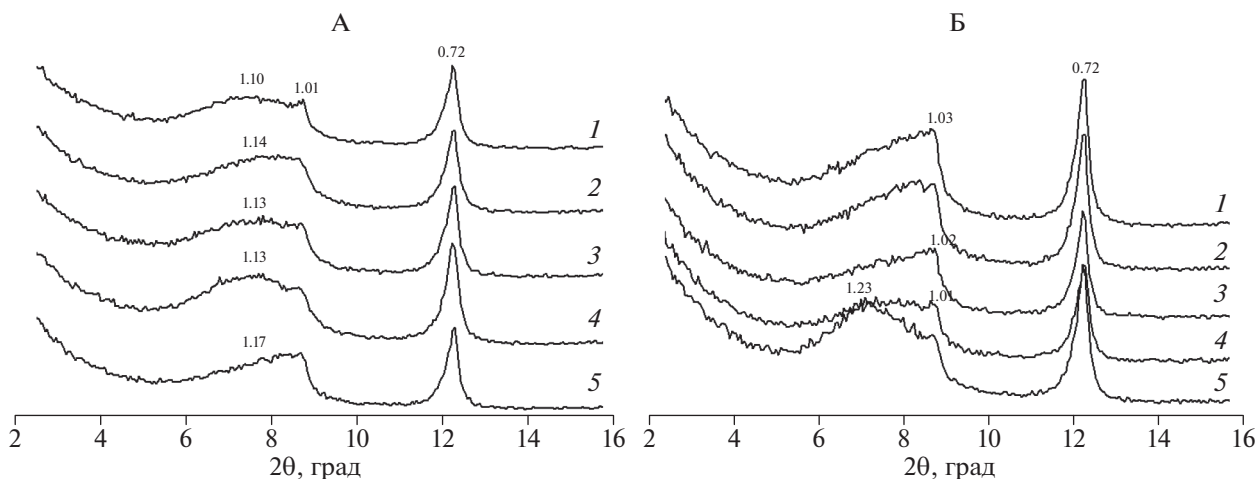


Рис. 2. Рентген-дифрактограммы илстых фракций после прокаливания при 350°C пяти повторностей (1–5) образцов из ризосферы клена (А) и образцов из вмещающей почвы (Б).

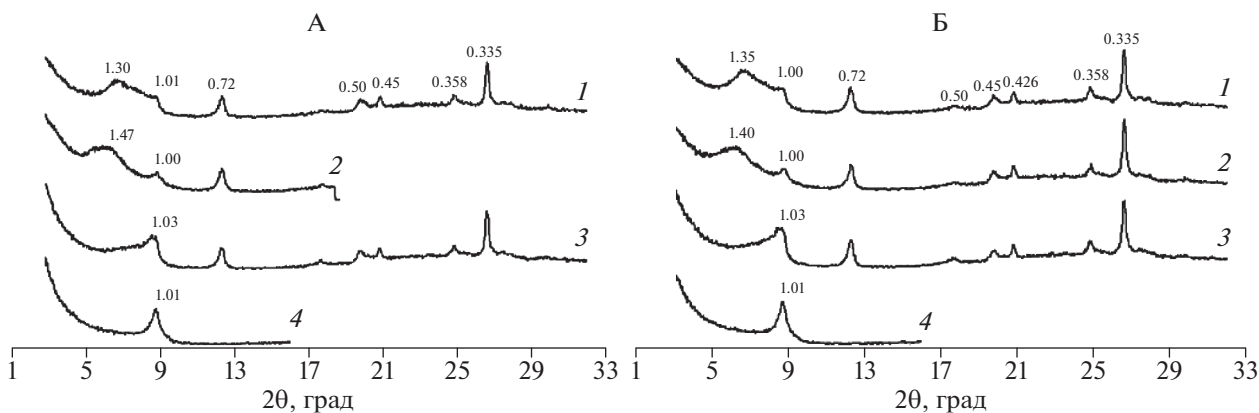


Рис. 3. Рентген-дифрактограммы препаратов насыщенной Са илистой фракции гор. АЕLao ризосферы ели (А) и вмещающей почвы (Б): исходных (1), насыщенных этиленгликолем (2), прокаленных при 350°C (3) и 550°C (4).

литовых и лабильных слоев, представленных вермикулитовыми и смектитовыми компонентами. Вероятно также присутствие вермикулита и смектита как самостоятельных фаз. Указанные минералы диагностируются как в ризосфере ели, так и во вмещающей почве (рис. 3).

Из табл. 2 видно, что почва ризосферы ели, так же как и почва ризосферы клена, содержит достоверно ($P > 0.9$) больше иллитовых минералов по сравнению с вмещающей почвой по рассмотренным выше причинам. В этом случае гипотеза об интенсификации процесса физического дробления крупных фракций до размера илстых частиц в ризосфере подтверждается достоверным увеличением количества ила в почве ризосферы по сравнению с вмещающей почвой. По процентному содержанию лабильных минералов и каолинита в сумме с хлоритом значимых различий между ризосферой и вмещающей почвой не выявлено.

Не обнаружено различий и в степени хлоритизации почвенных хлоритов – и в ризосфере, и во вмещающей почве эти минералы после прокаливания до 350°C дают примерно одинаковый широкий асимметричный пик в области 1 нм (рис. 3, 4), что соответствует начальной стадии хлоритизации.

Сравнительный анализ состава глинистого материала в ризосфере и во вмещающей почве под разными древостоями. Несмотря на небольшое расстояние между участками и сходство климатических, геоморфологических и литологических условий, между почвами двух участков выявлены существенные различия в процентном содержании отдельных групп глинистых минералов и в некоторых кристаллохимических особенностях отдельных фаз. Эти различия касаются не только почвы ризосферы разных пород деревьев, но и вмещающей почвы (рис. 2, 3).

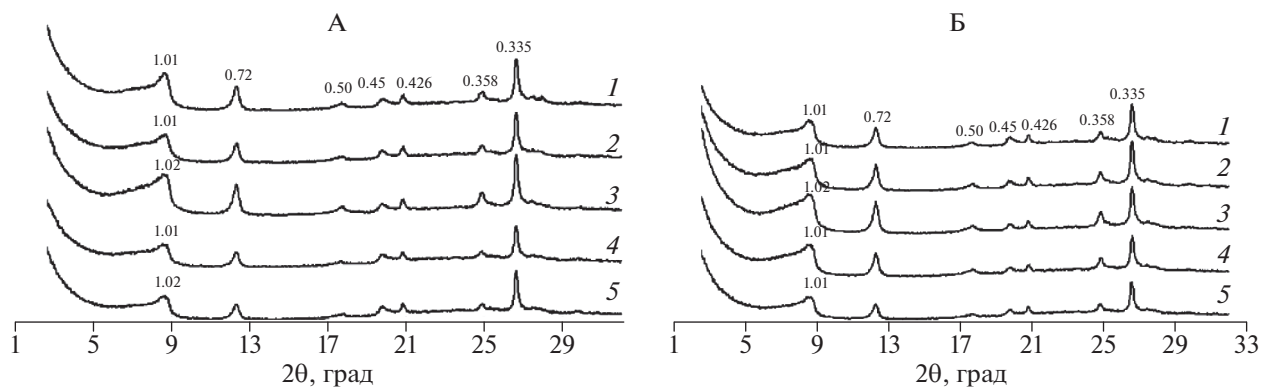


Рис. 4. Рентген-дифрактограммы препаратов илистой фракции после прокаливания при 350°C пяти повторностей (1–5) образцов почвы ризосферы ели (А) и вмещающей почвы под елью (Б).

Основные различия заключаются в следующем. В почве на участке под елью в составе илистой фракции содержание каолинита примерно в 1.5 раза меньше, а содержание слюдяных и иллитовых минералов, а также лабильных минералов в 1.5 раза больше, чем в почве участка с высокой долей клена. Отношение интенсивностей рефлексов первого и второго порядка иллитов в ризосфере клена варьирует в пределах от 2.0 до 2.3, что подтверждает диоктаэдрический характер заполнения октаэдрических сеток. В то же время в почве ризосферы ели и во вмещающей почве это отношение варьирует от 3.2 до 4.2, что может свидетельствовать о присутствии собственно слюд и слюд с дефицитом калия с заполнением октаэдрических сеток и по диоктаэдрическому, и по триоктаэдрическому типу.

Еще одним отличием в составе глинистого материала между почвами двух участков, как в ризосфере, так и во вмещающей почве, является меньшая степень хлоритизации почвенных хлоритов в составе илистой фракции участка под еловым древостоем (рис. 4). Сравнение рис. 2 и 4 показывает, что в почве под елью наблюдается значительно большее сжатие кристаллических решеток почвенных хлоритов в результате прокаливании при 350°C. По этому признаку почвенные хлориты, как в ризосфере, так и во вмещающей почве, в образцах всех пяти повторностей можно отнести к начальной стадии хлоритизации. Меньшая степень хлоритизации способствует увеличению доли лабильных минералов в составе илистой фракции.

Поскольку выявленные различия относятся как к ризосфере, так и к вмещающей почве, их частично можно объяснить пространственным варьированием состава исходного покровного суглинки в исследованном верхнем минеральном горизонте, чему способствуют процессы перемешивания почвы при частых и сильных ветровых [4]. В частности, относительно недавний (предположительно ~50 лет назад) ветровал

на участке под кленами мог привести к попаданию в гор. АЕLao материала из нижележащего гор. EL, в котором почвенные хлориты соответствуют более продвинутой стадии хлоритизации, чем в гор. АЕLao палево-подзолистых почв [2, 8, 17].

Вместе с тем найденные различия в минералогическом составе глинистого материала между ризосферой и вмещающей почве под кленами и ризосферой и вмещающей почвой под елью частично можно объяснить влиянием функционирования древостоев разного состава на процессы изменения глинистых минералов. Как уже отмечалось, не только ризосфера, но и вмещающая почва под еловым лесом характеризуется более низкими значениями pH водной и солевой суспензий, чем соответствующие характеристики почвы под кленовой парцеллой. Медианное ($n = 5$) значение pH в ризосфере ели составило 3.90, а по четырем разным годам наблюдений (данные не приводятся) варьировало от 3.90 до 4.46; во вмещающей почве эти величины варьировали в пределах от 4.10 до 4.54. В то же время в ризосфере клена значения pH варьировали по годам от 4.50 до 4.89, а во вмещающей почве — от 4.48 до 4.53. Известно, что при значениях pH < 4.4 существенно возрастает мобилизация Al [57], поэтому процесс хлоритизации в почве ризосферы ели находится на начальной стадии. При этом в отличие от почвы под кленовой парцеллой, принципиальных различий между почвой ризосферы ели и вмещающей почвой по степени хлоритизации минералов группы почвенных хлоритов не выявлено. Следует учитывать, что на участке разновозрастного елового леса есть деревья, возраст которых составляет ~100 лет, поэтому материал, который в настоящее время рассматривается как вмещающая почва, в прошлом мог быть ризосферой ели и испытывать влияние подкисляющего действия корней и эктомикоризных грибов. Такие условия не способ-

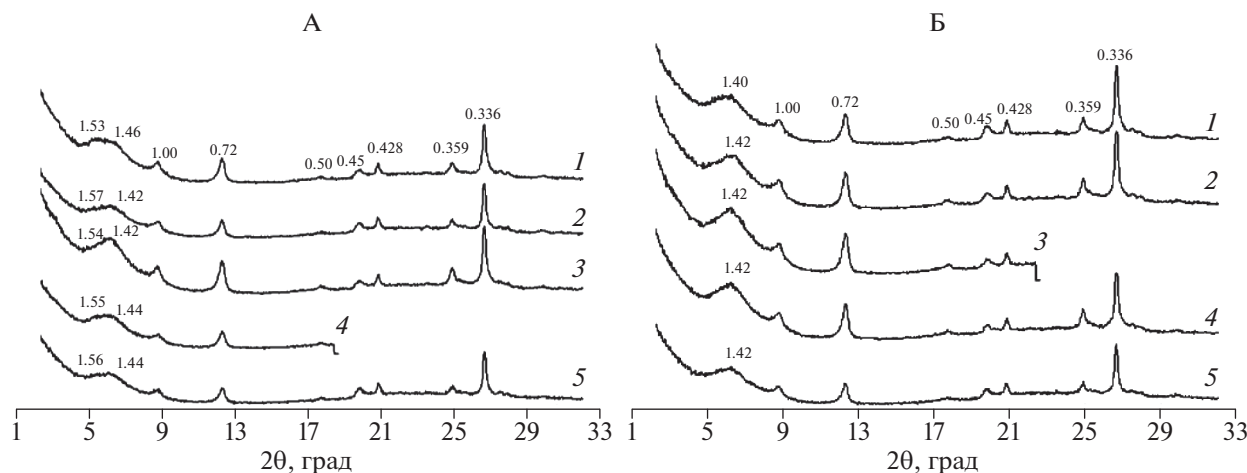


Рис. 5. Рентген-дифрактограммы препаратов илистой фракции, насыщенных этиленгликолем, пяти повторностей (1–5) образцов почвы ризосферы ели (А) и вмещающей почвы (Б).

ствовали образованию почвенных хлоритов на более продвинутой стадии хлоритизации.

Поскольку существенные различия в минералогическом составе илистых фракций между почвами под еловым лесом и кленовой парцеллой частично могут быть связаны с пространственной неоднородностью покровного суглинка, прямое сравнение состава глинистых минералов в почвах ризосферы ели и клена было бы не совсем корректно. В то же время для каждого из участков возможен сравнительный анализ изменений в составе глинистого материала в ризосфере по сравнению с вмещающей почвой.

Хотя в почве под еловым лесом не выявлено достоверных различий между ризосферой и вмещающей почвой по содержанию основных групп глинистых минералов, определяемых по методу Корнблюма, в ризосфере ели можно заметить признаки более глубокой трансформации слюдяных и иллитовых минералов в лабильные структуры по сравнению с вмещающей почвой. Это подтверждается большим смещением рефлекса в области 1.4 нм в сторону меньших углов θ при насыщении этиленгликолем в четырех из пяти повторностей образцов из ризосферы (рис. 5). Во вмещающей почве таких признаков глубокой трансформации слюд и иллитов не обнаружено. По неопубликованным данным В.А. Умновой (используются с разрешения автора) в подзолистой почве на том же участке под еловым древостоем содержание лабильных минералов в смешанном образце илистой фракции почвы ризосферы, составленном из пяти индивидуальных проб, было равно 12%, а в смешанном образце илистой фракции вмещающей почвы – только 6%.

Полученные данные позволяют заключить, что в почве ризосферы ели наблюдается тенденция к более глубокой трансформации иллитов в лабильные минералы. Эти результаты согласуются

с многочисленными литературными данными [18, 22, 38, 47, 49, 64]. Как уже отмечалось, выявленные изменения в составе глинистого материала ризосферы под *Picea abies* и другими хвойными древесными породами можно объяснить более кислой реакцией среды и большим содержанием органических лигандов в ризосфере за счет поступления корневых экссудатов и функционирования эктомикоризных грибов, продуцирующих низкомолекулярные органические кислоты.

Изучение специфики кислотно-основных свойств и выветривания минералов в ризосфере разных пород имеет еще один аспект, связанный с глобальным циклом химических элементов. Известно, что различия в кислотно-основных свойствах и в интенсивности выветривания минералов в почвах под разными типами леса могут существенно влиять на параметры большого геологического круговорота химических элементов. Установлено, что из почв под хвойными насаждениями возрастает вынос из почв ряда химических элементов по сравнению с выносом из почв под лиственными лесами за счет ускорения процесса выветривания минералов в условиях более кислой реакции среды [51]. В рамках данной работы этот вопрос специально не изучался. Вместе с тем, исходя из полученных данных, можно ожидать большей мобилизации оснований и алюминия и их выноса в нижележащие горизонты и за пределы почвенного профиля на участках с еловыми древостоями по сравнению с участками под широколиственными породами благодаря тем различиям в свойствах почв, которые связаны с ризосферными процессами.

ВЫВОДЫ

1. На участке под еловым древостоем и ризосфера ели, и вмещающая почва имеют более низ-

кие значения рН, чем на участке под кленами. При этом значения рН в ризосфере ели достоверно ниже, чем во вмещающей почве, в то время как в ризосфере клена значимых различий между этими показателями не выявлено.

2. Почва ризосферы клена и ризосферы ели по сравнению с соответствующей вмещающей почвой характеризуется достоверно большим содержанием слюды и иллитов в составе иллитовой фракции, что можно объяснить интенсификацией в ризосфере деревьев процессов физического дробления этих минералов, заключенных в составе более крупных фракций, и усилением процесса иллитизации.

3. В почве ризосферы и во вмещающей почве под еловым древостоем в составе иллитовой фракции содержится больше лабильных минералов и меньше каолинита и слюды и иллитов, чем в почве ризосферы и во вмещающей почве под кленовой парцеллой. Эти различия частично можно объяснить пространственной неоднородностью состава глинистого материала покровного суглинки, и частично — спецификой функционирования разных древесных культур и связанного с ними микробного сообщества, определяющей более низкие значения рН в почве под еловым древостоем.

4. Почва ризосферы клена по сравнению с вмещающей почвой характеризуется более продвинутой стадией хлоритизации минералов группы почвенных хлоритов вследствие благоприятных для процесса хлоритизации кислотно-основных условий.

5. В почве ризосферы ели по сравнению с вмещающей почвой выявлена тенденция к более глубокой трансформации слюды и иллитов в лабильные структуры за счет более кислой реакции среды, способствующей мобилизации Al.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 17-04-00374/17.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Айдинян Р.Х.* Извлечение ила из почв. М.: Гипроводхоз, 1960. 10 с.
2. *Алексеева С.А., Дронова Т.Я., Соколова Т.А.* Химико-минералогическая характеристика подзолистых и болотно-подзолистых почв, развитых на двучленных отложениях // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2007. № 3. С. 31–37.
3. *Благовещенский Ю.Н., Дмитриев Е.А., Самсонова В.П.* Применение непараметрических методов в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 98 с.
4. *Васнев И.И., Таргульян В.О.* Ветровал и таежное почвообразование. М.: Наука, 1995. 248 с.
5. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
6. *Данилин И.В.* Сравнительный анализ химических свойств палево-подзолистой почвы в ризосфере клена остролистного (*Acer platanoides*) и во внеризосферном пространстве // Сб. XXIV Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2017”, Секция “Почвоведение”. М.: МАКС Пресс, 2017. С. 223.
7. *Карпачевский Л.О.* Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 311 с.
8. *Кирюшин А.В., Соколова Т.А., Дронова Т.Я.* Минералогический состав тонкодисперсных фракций подзолистых и торфянисто-подзолисто-глеватых почв на двучленных отложениях Центрального лесного заповедника // Почвоведение. 2002. № 11. С. 1359–1370.
9. Классификация почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015. Научные редакторы перевода: М.И. Герасимова, П.В. Красильников. ФАО и МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017.
11. Регуляторная роль почвы в функционировании таежных экосистем / Отв. ред. Г.В. Добровольский. М.: Наука, 2002. 364 с.
12. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Под. ред. Г. Брауна. М.: Мир, 1965. 599 с.
13. *Родин Л.Е., Базилевич Н.И.* Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.: Наука, 1965. 250 с.
14. *Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И.* Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.
15. *Соколова Т.А., Толпешта И.И., Лысак Л.В., Чалова Т.С.* Специфика некоторых свойств почвы в ризосфере ели в горизонте АЕL подзолистой почвы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2015. № 4. С. 3–11.
16. *Таргульян В.О., Герасимова М.И.* (составители и научные редакторы). Мировая корреляционная база почвенных ресурсов: основа для международной классификации и корреляции почв. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. 371 с.
17. *Толпешта И.И., Соколова Т.А., Бонифачио Э., Фальсонэ Г.* Почвенные хлориты в подзолистых почвах разной степени гидроморфизма // Почвоведение. 2010. № 7. С. 831–842.
18. *Толпешта И.И., Соколова Т.А., Воробьева А.А., Изиимова Ю.Г.* Трансформация триоктаэдрической слюды в верхнем минеральном горизонте подзолистой почвы по результатам двухлетнего полевого эксперимента // Почвоведение. 2018. № 7. С. 902–915. doi 10.1134/S0032180X18070134
19. *Холопова Л.Б.* Динамика свойств почв в лесах Подмосковья. М.: Наука, 1982. 120 с.

20. *April R., Keller D.* Mineralogy of the rhizosphere in forest soils of the eastern United States // *Biogeochemistry*. 1990. V. 9. P. 1–18.
21. *Arocena J.M., Glowa K.R.* Mineral weathering in ectomycorrhizosphere of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook) Nutt.) as revealed by soil solution composition // *Forest Ecology and Management*. 2000. V. 133. P. 61–70.
22. *Arocena J.M., Glowa K.R., Massicotte H.B., Lavkulich L.* Chemical and mineral composition of ectomycorrhizosphere soils of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook) Nutt.) in the E horizon of a luvisol // *Can. J. Soil Sci.* 1999. V. 79. P. 25–35.
23. *Augusto L., Ranger J., Turpault M.-P., Bonnaud P.* Experimental in situ transformation of vermiculites to study the weathering impact of tree species on the soil // *Europ. J. Soil Sci.* 2001. V. 52. P. 81–92.
24. *Bakker M.R., George E., Turpault M.-P., Zhang J.L., Zeller B.* Impact of Douglas fir and Scots pine seedlings on plagioclase weathering under acid conditions // *Plant and Soil*. 2004. V. 266. P. 247–259.
25. *Bonneville S., Morgan D.J., Schmalenberger A., Bray A., Brown A., Banwart S.A., Benning L.G.* Tree-mycorrhiza symbiosis accelerates mineral weathering: Evidences from nanometer-scale elemental fluxes at the hypha-mineral interface // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2011. V. 75. P. 6988–7005.
26. *Bourbia S.M., Barré P., Kaci M.B.N., Derridj A., Velde B.* Potassium status in bulk and rhizospheric soils of olive groves in North Algeria // *Geoderma*. 2013. V. 197–198. P. 161–168.
27. *Calvaruso C., Turpault M.-P., Frey-Klett P.* Root-Associated Bacteria Contribute to Mineral Weathering and to Mineral Nutrition in Trees: a Budgeting Analysis // *Applied and Environmental Microbiology*. Feb. 2006. P. 1258–1266.
28. *Courchesne F., Gobran G.R.* Mineralogical Variations of Bulk and Rhizosphere Soils from a North Spruce // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1997. V. 61. P. 1245–1249.
29. *Courty P.-E., Buée M., Diedhiou A.G., Frey-Klett P., Le Tacon F., Rineau., Turpault M.-P., Uroz S., Garbaye J.* The role of ectomycorrhizal communities in forest ecosystem processes: New perspectives and emerging concepts // *Soil Biol. Biochem.* 2010. V. 42. P. 679–698.
30. *Dakora F.D., Phillips D.A.* Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments // *Plant and Soil*. 2002. V. 245. P. 35–47.
31. *Dessaux Y., Hinsinger P., Lemanceau P.* Rhizosphere: so many achievements and even more challenges // *Plant and Soil*. 2009. V. 321. P. 1–3.
32. *Dieffenbach A., Matzner E.* In situ soil solution chemistry in the rhizosphere of mature Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) trees // *Plant and Soil*. 2000. V. 222. P. 149–161.
33. *Dijkstra F.A., Geibe C., Holmström S., Lundström U.S., van Breemen N.* The effect of organic acids on base cation leaching from the forest floor under six North American tree species // *Europ. J. Soil Sci.* 2001. V. 52. P. 205–214.
34. *Dijkstra F.A., Fitzhugh R.D.* Aluminum solubility in relation to organic carbon in surface soils affected by six tree species of the northeastern United States // *Geoderma*. 2003. V. 114. P. 33–47.
35. *Dinesh R., Srinivasan V., Hamza S., Parthasarathy V.A., Aipe K.C.* Physico-chemical, biochemical and microbial properties of the rhizospheric soils of tree species used as supports for black pepper cultivation in the humid tropics // *Geoderma*. 2010. V. 158. P. 252–258.
36. *Dixon J.B., Schulze D.G.* *Soil Mineralogy with Environmental Application*. Madison, Wisconsin, USA, 2002. 866 p.
37. *Finlay Roger D.* Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium // *J. Experimental Botany*. 2008. V. 59. P. 1115–1126.
38. *Glowa K.R., Arocena J.M., Massicotte H.B.* Properties of soils influenced by ectomycorrhizal fungi in hybrid spruce [*Picea glauca* × *engelmannii* (Moench.) Voss] // *Can. J. Soil Sci.* 2004. V. 84. P. 91–102.
39. *Gobran G.R., Clegg S., Courchesne F.* Rhizosphere processes influencing the biogeochemistry of forest ecosystems // *Biogeochemistry*. 1998. V. 42. P. 107–120.
40. *Gregory P.J.* Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science // *Europ. J. Soil Sci.* 2006. V. 57. P. 2–12.
41. *Griffits R.P., Baham J.E., Caldwell B.A.* Soil solution chemistry of ectomycorrhizal mats in forest soil // *Soil Biol. Biochem.* 1994. V. 26. P. 331–337.
42. *Hagen-Thorn A., Callesen I., Armolaitis K., Nilgård B.* The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 195. P. 373–384.
43. *Hinsinger P., Jaillard B., Dufey J.E.* Rapid Weathering of Trioctahedral Mica by the Roots of Ryegrass // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992. V. 56. P. 977–982.
44. *Jones D.L.* Organic acids in the rhizosphere – a critical review // *Plant and Soil*. 1998. V. 205. P. 25–44.
45. *Kluber L.A., Tinnesand K.M., Caldwell B.A., Dunham S.M., Yarwood R.R., Bottomley P.J., Myrold D.D.* Ectomycorrhizal mats alter forest soil biogeochemistry // *Soil Biol. Biochem.* 2010. V. 42. P. 1607–1613.
46. *Kuzuyakov Y., Blagodatskaya E.* Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review // *Soil Biol. Biochem.* 2015. V. 83. P. 184–199.
47. *Leyval C., Berthelin J.* Weathering of mica by roots and rhizospheric microorganisms of pine // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1991. V. 55. P. 1009–1101.
48. *Moore D.M., Reynolds R.C.* *X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals*. Oxford – New York, 1997. 378 p.
49. *Naderizadeh Z., Khademi H., Arocena J.M.* Organic matter induced mineralogical changes in clay-sized phlogopite and muscovite in alfalfa rhizosphere // *Geoderma*. 2009. V. 159. P. 296–303.
50. *Otero X.L., González-Guzmán A., Souza-Junior V.S., Pérez-Alberti A., Macías F.* Soil processes and nutrient bioavailability in the rhizosphere of *Bolax gummifera* in a subantarctic environment (Martial Mountains, Ushuaia – Argentina) // *Catena*. 2015. V. 133. P. 432–440.
51. *Ouimet R., Duchesne L.* Base cation mineral weathering and total release rates from soils in three calibrated for-

- est watersheds on the Canadian Boreal Shield // *Can. J. Soil Sci.* 2005. V. 85. P. 245–260.
52. Paris F., Bonnaud P., Ranger J., Lapeyrie F. In vitro weathering of phlogopite by ectomycorrhizal fungi. I. Effect of K⁺ and Mg²⁺ deficiency on phyllosilicate evolution // *Plant and Soil*. 1995. V. 177. P. 191–201.
 53. Ranger J., Dambrine E., Robert M., Righi D., Felix C. Study of current soil-forming processes using bags of vermiculites and resins placed within soil horizons // *Geoderma*. 1991. V. 48. P. 335–350.
 54. Ranger J., Nys C. The effect of spruce (*Picea Abies* Karst.) on soil development: an analytical and experimental research // *Europ. J. Soil Sci.* 1994. V. 45. P. 193–204.
 55. Sandnes Arne, Eldhuset Toril D., Wolleb Gro. Organic acids in root exudates and soil solution of Norway spruce and silver birch // *Soil Biol. Biochem.* 2005. V. 37. P. 259–269.
 56. Skyllberg U., Raulund-Rusmussen K., Borggaard O.K. pH buffering in acidic soils developed under *Picea abies* and *Quercus robur* – effects of soil organic matter, adsorbed cations and soil solution ionic strength // *Biogeochemistry*. 2001. V. 56. P. 51–74.
 57. Sposito G. The Environmental chemistry of aluminium. CRC Press, Boca Raton. Florida. USA. 1989. 317 p.
 58. Stumm W. Chemistry of the Solid Water Interface. John Wiley & Sons, Inc. New York/Chichester/Brisbane/Toronto/Singapore. 1992. 428 p.
 59. Tuason M.M.S., Arocena J.M. Root organic acid exudates and properties of rhizosphere soils of white spruce (*Picea glauca*) and subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) // *Can. J. Soil Sci.* 2009. V. 89. P. 287–300.
 60. Turpault M.-P., Gobran G.R., Bonnaud P. Temporal variations of rhizosphere and bulk soil chemistry in a Douglas fir stand // *Geoderma*. 2007. V. 7. P. 490–496.
 61. Turpault M.-P., Utérano C., Boudot J.-P., Ranger J., Influence of mature Douglas fir roots on the solid soil phase of the rhizosphere and its solution chemistry // *Plant and Soil*. 2005. V. 275. P. 327–336.
 62. Turpault M.P., Righi D., Utérano C. Clay minerals: precise markers of the spatial and temporal variability of the biogeochemical soil environment // *Geoderma*. 2008. V. 147. P. 108–115.
 63. Vetterlein Doris, Kühn Thomas, Kaiser Klaus, Jahn Reinhold. Illite transformation and potassium release upon changes in composition of the rhizosphere soil solution // *Plant and Soil*. 2013. V. 371. P. 267–279.
 64. Zhang J., Eckhard G. Rhizosphere effects on ion concentrations near different root zones of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and root types of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (L.) seedling // *Plant and Soil*. 2009. V. 322. P. 209–218.

Acid–Base Characteristics and Clay Mineralogy in the Rhizospheres of Norway Maple and Common Spruce and in the Bulk Mass of Podzolic Soil

T. A. Sokolova^{a,*}, I. I. Tolpeshta^a, I. V. Danilin^a, Yu. G. Izosimova^a, and T. S. Chalova^a

^aLomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: sokolt65@mail.ru

Acid–base characteristics and composition of clay minerals were estimated in the rhizospheres of Norway maple (*Acer platanoides*) and common spruce (*Picea abies*) and in the corresponding bulk soil samples taken in five replicates from the AELao horizon of podzolic soils. On the plot under spruce forest, both rhizospheric and nonrhizospheric soils were found to be more acid than those on the plot with a considerable part of maple trees in the forest stand. No reliable differences in pH values were found between the maple rhizosphere and corresponding bulk soil, while the rhizospheric soil under spruce forest had significantly lower pH values as compared with the enclosing soil. The rhizospheric soil under both tree species was found to contain reliably more illite minerals in clay-sized fraction, which could be due to the intensification of illitization and physical disintegration of micas and illites in coarse fractions. Under spruce forest stand, the clay fraction in both rhizospheric and nonrhizospheric soils contained more expandable minerals and less kaolinite and illites as compared with those under maple parcel. These differences can be explained partly by the spatial variability of clay composition in the parent material (mantle sandy loam) and, partly, by the dissimilarities in the functioning of different tree species and associated microbial communities causing lower pH values in soils under spruce forest. In the maple rhizospheric soil pedogenic chlorites were characterized by a higher degree of aluminization in comparison with the enclosing soil owing to more favorable acid–base conditions. A tendency for a deeper transformation of illites into expandable clay minerals was revealed in the spruce rhizospheric soil as compared with the bulk soil, which can be explained by a more acid reaction facilitating the mobilization of aluminum.

Keywords: soil acidity, transformation of phyllosilicates, pedogenic chlorites, physical disintegration of micas and illites, illitization