

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.44

ДИАГНОСТИКА ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОЧВ В РАЗЛИЧНЫХ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ (ОБЗОР)¹

© 2022 г. М. Т. Казинский^а, И. Н. Семенов^а, *

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

*e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

После доработки 06.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Рассмотрены и обобщены подходы к выделению вулканических почв в классификациях России, США, Новой Зеландии и FAO-WRB. В классификации почв России диагностическим критерием полнопрофильных вулканических почв является специфичный горизонт BAN с плотностью менее 1 г/см³, внутренней псевдотиксотропией, икряной структурой, высоким содержанием оксалаторастворимых Al (10–15%), Fe (2–6%) и Si (4–7%), а также гумуса. В системах WRB (Andosols) и Soil Taxonomy (Andisols) вулканические почвы диагностируют по наличию высокого содержания аллофанов и/или органо-минеральных комплексов Al и Fe – так называемых плохо упорядоченных веществ, а также низкой плотности (менее 0.9 г/см³) и высокой фиксации фосфора. В Новозеландской классификации к вулканическим (на самом высоком иерархическом уровне – аллофановым и пемзовым – Allophanic и Pumice Soils) относят почвы, сформированные на изверженных породах с низкой плотностью, высоким содержанием вулканического песка и крупнозема и высокой фиксацией фосфора. Надежная диагностика вулканических почв в полевых условиях возможна в классификациях России и Новой Зеландии. В подходах WRB и Soil Taxonomy обязательна уточняющая лабораторная диагностика. Прямая корреляция названий вулканических почв возможна лишь на высоком иерархическом уровне: из новозеландских почвенных порядков и подпорядков и российских отделов и типов в реферативную почвенную группу Andosols по WRB и почвенную группу Andisols по Soil Taxonomy и между двумя последними. Хотя для надежности необходимо обладать морфологическими описаниями конкретных профилей и результатами аналитических исследований из-за различий в применяемых пороговых значениях. Для адекватного перевода названий почв из одной классификационной системы в другую, как правило, необходимо обращаться к их морфологическим и химическим свойствам.

Ключевые слова: вулканические почвы, Andosols, аллофаны, тефра, пирокластический материал, выветривание, Камчатка, диагностика почв

DOI: 10.31857/S0032180X22010075

ВВЕДЕНИЕ

Поступающие на поверхность почвы рыхлый пирокластический материал и другие продукты вулканической деятельности формируют слой мощностью от долей до десятков сантиметров. В результате циклических погребений почв образуется сложный слоистый полигенетический профиль, состоящий из нескольких наложенных друг на друга элементарных профилей. Таким образом, в районах современной вулканической активности выделяется еще один фактор почвообразования – вулканическая деятельность [17] и существуют предпосылки для диагностики вулканических почв на основе наличия собственно

вулканического материала в профиле или специфичных свойств. Однако в российской классификации [10] диагностические критерии выделения отдела вулканических почв по горизонту BAN пока слабо проработаны.

Почвы, сформированные под влиянием вулканической деятельности, занимают более 11000 км² поверхности суши [16, 22]. Несмотря на развитие в условиях от полярного до экваториального климата, во многих классификациях почв их выделяют как отдельную группу на наивысшем иерархическом уровне, что отражает высокую степень самобытности. Например, в классификации почв России [10] отдел вулканических почв характеризуется большим таксономическим расстоянием от других почвенных отделов даже внутри ствола синлитогенного почвообразования [18].

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X22010075.

В российской классификации [9, 15] вулканические почвы выделяют на уровне одноименного отдела внутри ствола постлитогенного почвообразования, а также двух типов (слоисто-пепловых почв) отдела слаборазвитых. Кроме того, среди подбуров и подзолов выделяют охристые подтипы по яркой окраске железисто-гумусовых пленок, покрывающих поверхности минеральных зерен и агрегатов, и высокому содержанию гумуса (2–5%) и аморфных оксидов Fe (1.5–3%) и Al (2–6%) в срединном горизонте, формирующемся на продуктах выветривания, содержащих вулканическое стекло.

Термин “Andosols”, широко используемый в зарубежных классификациях, восходит к японскому сочетанию “темная почва”, так как самобытность почв на вулканических породах впервые была показана японскими специалистами [31, 35]. Однако современная японская классификация почв базируется на американских подходах [31], поэтому в настоящем обзоре мы ее не рассматриваем. В американской Soil Taxonomy [29, 36] почвы на вулканическом субстрате выделяются в ранге порядка (Soil Orders) как Andisols и подгруппы (Subgroups) Vitri(xer)andic внутри больших групп (Great Groups) 5 из 12 порядков: Alfisols, Aridisols, Gelisols, Inceptisols, Mollisols. Таким образом, по Soil Taxonomy лишь в Histosols, Oxisols, Spodosols, Ultisols и Vertisols не предполагается значимого влияния вулканического материала на свойства почв. Подгруппу Vitrandic выделяют в случаях наличия в почве одного или нескольких горизонтов мощностью более 18 см в верхней (до 75 см) части профиля, удовлетворяющих хотя бы одному критерию: 1 – содержание более 66% крупнозема, образующего >35% объема почвы и состоящего из вулканического пепла (cinders), пемзы или пемзоподобных фрагментов; 2 – фракция частиц диаметром 0.02–2 мм составляет $\geq 30\%$ мелкозема, состоит на $\geq 5\%$ из вулканического стекла при повышенном² содержании оксалаторастворимых Al и Fe. То есть почвы подгруппы Vitrandic формируются на хорошо выветрелом вулканическом материале. Почвы подгруппы Vitixerandic формируются в более сухих условиях, нежели Vitrandic: весь их профиль остается сухим на протяжении $\geq 3/4$ времени года (нормального по гидротермическим условиям), когда температура почвы на глубине 50 см составляет $\geq 5^\circ\text{C}$, а влажностной режим (soil moisture regime) соответствует нижней границе xeric.

В WRB [16] Andosols выделяют как десятую ферративную почвенную группу (РПГ). Как один из главных квалификаторов Andic и Vitric есть в Histosols и Podzols (один из нижних квалификаторов, то есть в названии почвы будет стоять дале-

ко от названия РПГ), а также в Cambisols (один из средних квалификаторов). Квалификатор Tephric как главный рекомендован для Histosols, Regosols, Arenosols и Cambisols (табл. S1). Все 3 упомянутых квалификатора используются как дополнительные в половине РПГ.

В новозеландской классификации [26] вулканическим почвам соответствуют порядки Аллофановых³ (Allophanic) и Пемзовых почв (Pumice) из 15-ти таксономических единиц наивысшего уровня. Кроме того, среди оставшихся 13-ти почвенных порядков выделяют подпорядок Tephric среди порядков Recent и Raw Soils, группу Allophanic и Vertic внутри Brown и Melanic Soils соответственно, а также Mafic среди порядков Brown и Melanic Soils. Последние почвы развиваются преимущественно на слабовыветрелых и реже средне- и сильновыветрелых эффузивных породах основного состава (обломки мафических минералов занимают $\geq 5\%$ объема почвы).

Цель работы – сравнительный анализ диагностики и классификации вулканических почв. Мы сфокусировались на классификациях почв России, FAO-WRB, США и Новой Зеландии, где реализованы наиболее сильно отличающиеся подходы к выделению вулканических почв. Почвы, переходные к вулканическим или с признаками, отражающими формирование на эффузивном материале, в настоящем обзоре детально не рассмотрены, так как основное внимание посвящено признакам, наиболее ярко проявляющимся в центральном об-разе – наиболее развитых вулканических почвах.

ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПОЧВЫ В РОССИЙСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

В российском почвоведении вулканические почвы впервые включили в общую классификационную схему в 1997 г. [9], хотя на картах Камчатки и Курил их отображали существенно раньше. Вулканические почвы образуются в условиях активной вулканической деятельности с выбросами пеплового материала и диагностируются в классификации [15] по наличию серии погребенных профилей. Для разделения на более низком иерархическом уровне используется соотношение интенсивности пеплопадов и почвообразования [17] (рис. S1).

При интенсивных пеплопадах пирокластические породы не успевают преобразовываться, из-за чего непосредственно под органогенным горизонтом находится почвообразующая порода. В зоне умеренных пеплопадов скорость почвообразования и поступление свежего материала сопоставимы, поэтому в почвенном профиле можно

² Показатель $(60 \times (\text{Alox} + 1/2\text{Feox}) + \text{содержание вулканического стекла}) \geq 30\%$.

³ При наличии однозначного русскоязычного эквивалента по тексту используется только русский термин, написанный с заглавной буквы.

выделить и генетические горизонты, и серию погребенных профилей. При слабых пеплопадах вулканическая деятельность влияет только на минеральный состав твердой фазы; слоистость и погребенные органогенные горизонты слабо заметны или отсутствуют вовсе. Наконец, при небольшом количестве поступающих пепловых частиц прослеживаются лишь отдельные признаки, свойственные вулканическим почвам.

Диагностический критерий выделения вулканических почв — наличие срединного охристого горизонта VAN [10] с хорошо выраженной икряной структурой [15]. Кроме того, всем почвам данного отдела свойственны слоистость и полигенетичность профиля, высокое содержание органического вещества, особая минералогия илистой фракции (преобладание легко выветривающихся минералов и обилие аморфных минералов, например, аллофана) и состав органо-минеральных соединений, специфические водно-физические свойства (высокая внутри- и межагрегатная пористость, провальная фильтрация и одновременно высокая водоудерживающая способность). Почвы имеют легкий гранулометрический состав, низкую емкость поглощения из-за преобладания аморфных минералов, (слабо)кислую реакцию среды и ненасыщенный основаниями поглощающий комплекс (табл. S2, S3).

Отдел вулканических почв по верхнему горизонту делят на 4 типа [10]: охристые с системой горизонтов AO–BH–VAN–C–{ABC}, перегнойно-охристые H–VAN–C–{ABC}, охристо-подзолистые AO–E–BH–VAN–C–{ABC} и агроохристые P–VAN–C–{ABC}.

ANDOSOLS В КЛАССИФИКАЦИИ WRB

Andosols распространены во всех климатических (кроме гипераридного) и геоморфологических условиях, формируются под воздействием кислотного выветривания на эффузивных породах, богатых вулканическим стеклом (пеплы, туфы, пемзы, вулканические шлаки и др.), или на других силикатных породах. Andosols среди остальных РПГ выделяются наличием существенного количества аллофана в составе илистой фракции или алюмо-гумусовых комплексов, а также как минимум одного горизонта, имеющего свойство andic или vitric (табл. S4) [16]. Andosols с горизонтом vitric формируются на территориях распространения современного вулканизма в условиях умеренного и субарктического климата, а с горизонтом andic — в более теплом климате, способствующем интенсификации выветривания.

Также в WRB предусмотрены специфичные квалификаторы, используемые только при диагностике Andosols — Hydric и Eutrosilic (главные квалификаторы), и Astoxic и Melanic (дополнительные квалификаторы).

Материал и квалификактор tephric. При отсутствии активного выветривания изверженного материала диагностируют материал tephric, состоящий из слабовыветрелых продуктов вулканических извержений (пеплы, лапилли, пемза, ноздреватые пемзоподобные и пористые пирокластические обломки, включая вулканические бомбы), либо из переотложенной и измененной тефры в смеси с материалом иного происхождения, например, вулканогенного лёсса, песка или аллювия. Во фракции 0.02–2 мм такого материала содержится $\geq 30\%$ от общего числа зерен вулканического стекла, сцементированных стеклом агрегатов и покрытых стеклом первичных минералов.

Квалификатор Tephric присваивают почве, если материал tephric мощностью ≥ 30 см (≥ 10 см в случае непосредственного подстилания плотной породой, техногенным, сцементированным или затвердевшим материалом) появляется с глубины ≤ 50 см.

Свойство, горизонт и квалификактор vitric. Материал со свойством vitric содержит много вулканического стекла и других вулканогенных первичных минералов при малой доле аллофана и удержании фосфатов и удовлетворяет трем условиям (табл. S5).

Горизонт со свойствами vitric может содержать большое количество органического вещества, располагаться на поверхности почвы или покрываться свежими пирокластическими отложениями и соответствует фазе первичного выветривания пирокластических пород, обычно формируясь непосредственно из свежей вулканической тефры — материала tephric. По интенсивности педогенного преобразования субстрата можно выстроить следующий ряд материалов: tephric → со свойством vitric → со свойством andic (рис. S2).

Квалификатор Vitric (как и Andic) присваивают почве, если материал vitric или andic мощностью ≥ 30 см (для Cambisols и Andosols ≥ 15 см) встречается на глубине до 100 см.

Свойство и квалификактор andic. Свойство andic связано с умеренной интенсивностью выветривания материнских пирокластических отложений и наличием слабо окристаллизованных минералов и металлоорганических комплексов. Горизонты со свойствами andic обычно богаты органическим веществом ($C_{орг} > 5\%$), темноокрашены (насыщенность и светлота влажной почвы не более 3 по цветовой системе Манселла), имеют порошистую (рыхлую — fluffy) макроструктуру, рыхлое сложение и относительно тяжелый гранулометрический состав (не легче пылеватого суглинка). Свойство andic диагностируют аналитически по выполнению трех условий (табл. S6) с рекомендацией использования при полевой диагностике теста с NaF [24]:

Выделяют 2 основных варианта свойств andic [16]: silandic – материал с преобладанием аллофанов, слабокислой и нейтральной средой и светлой окраской и aluandic – материал с преобладанием алюмо-органических комплексов (плохо упорядоченных веществ), сильнокислой средой и темной окраской вещества, а также переходный – alusilandic (табл. S5).

Свойство andic неспецифично для Andosols и может встречаться в почвах влажного прохладного и умеренно теплого климата на силикатных отложениях, например, Podzols.

ANDISOLS B SOIL TAXONOMY

В Soil Taxonomy Andisols выделяют как почвы, формирующиеся на изверженных вулканических породах в различных климатических условиях. Кроме того, Andisols могут образоваться на невулканическом субстрате при появлении аморфных минералов в результате выветривания первичных алюмосиликатов [36].

Andisols диагностируют, если более 60% верхней части почвы (до 60 см) имеет свойство andic⁴, начиная с верхнего минерального или органического горизонтов при условии отсутствия плотной породы (densic, lithic, or paralithic contact) или подстилания горизонтом duripan или petrocalcic⁵ [29]. Если данные почвы нарушены культивированием, то они должны иметь свойство andic хотя бы в 36 см ниже антропогенно-измененных горизонтов. В случае слоистости почвы Andisols выделяют, если суммарная мощность горизонтов, имеющих свойство andic не меньше 36 см в верхних 60 см почвы [36].

Свойство andic характерно для слабовыветрелых почв с высоким содержанием вулканического стекла или средневыветрелых почв, богатых слабоупорядоченными или окристаллизованными (short-range-order or poorly crystalline) продуктами выветривания и меньшим количеством остатков стекла [27], и диагностируют, если содержание $C_{орг} \leq 25\%$ и выполняется один или оба критерия 1 и 2 (табл. S7; рис. S3).

Большинство подпорядков Andisols (Aquands, Geland, Cryands, Torrands, Xerands и Ustands) выделяют по гидротермическим характеристикам. Vitrands и Udands диагностируют по водоудерживающей способности, которая при 1500 кПа должна быть соответственно ≤ 15 и 30% в воздушно-сухих и невысушенных образцах на протяжении $\geq 60\%$ мощности слоя со свойствами andic:

⁴ Критерии для выделения свойства andic отличаются в WRB и Soil Taxonomy.

⁵ При близком подстилании плотной породой (densic, lithic, or paralithic contact) или горизонтом duripan или petrocalcic 60-сантиметровая мощность субстрата со свойствами andic не имеет диагностической важности.

верхнего 60 см или менее мощного при залегании на горизонте duripan или petrocalcic или плотной породе (densic, lithic или paralithic contact). Udands диагностируют по остаточному принципу среди Andisols.

Формирующиеся под травянистой или лесной растительностью Aquands диагностируют по режиму aquic, при котором почвы насыщены водой в течение длительного времени, не указанного в классификации, имеют глеевую обстановку и температуру выше 5°C. Aquands диагностируют по наличию торфяного горизонта или темноокрашенного гумусового горизонта и устойчивому оглеению [29].

Geland и Cryands выделяют по режиму gelic (среднегодовая температура почвы на глубине 50 см $< 0^\circ\text{C}$) и stic (среднегодовая температура почвы на глубине 50 см 0–8 и 0–6°C в минеральных и органогенных почвах, а летняя находится в диапазоне 0–13°C (табл. S8) при отсутствии в профиле многолетнемерзлых пород). Geland распространены на территориях с континентальным климатом с высокой годовой амплитудой температур и отсутствием многолетней мерзлоты. Широко распространенные Cryands хорошо дренированы, промерзают и формируются на позднеплейстоценовых или голоценовых отложениях (в США) обычно под хвойными лесами в северном полушарии севернее 49 параллели и в горах южного полушария [29].

Udands, Ustands, Xerands и Torrands с соответствующими режимами udic, ustic, xeric и aridic (torric) отличаются по длительности периода полного иссушения почвенного профиля (табл. S9).

Torrands имеют ограниченное распространение (в западной части Северной Америки и на островах Тихого океана) под травянистой или кустарниковой растительностью на позднеплейстоценовых и голоценовых отложениях. В США Xerands формируются в условиях средиземноморского климата на позднеплейстоценовых и голоценовых отложениях. Образующиеся под различной растительностью (травянистой, кустарниковой, реже – древесной) Ustands в условиях семигумидного и семиаридного климата распространены в Мексике, западной части Северной Америки (на позднеплейстоценовых и голоценовых отложениях), островах Тихого океана и Восточной Африке [29].

Vitrands как молодые почвы, в основном сформированные на грубых голоценовых отложениях, распространены вблизи вулканов (в США под хвойными лесами). Udands образуются под лесами в условиях влажного климата на позднеплейстоценовых и голоценовых отложениях в пределах Тихоокеанского вулканического огненного кольца (the Pacific Rim) [29].

ПОЧВЫ НА ВУЛКАНИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ В НОВОЗЕЛАНДСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПОЧВ

В новозеландской классификации [26], во многом коррелирующей с Soil Taxonomy, материал вулканических почв разделяют на 3 вида: тэфровый (tephric), витриковый (vitric) и аллофановый (allophanic).

Материал *tephric* [25] состоит из свежего пирокластического вещества либо преобразованного или смешанного с другим (тэфровый лёсс, песок и т. д.). Как правило, в его песчаной фракции из андезитового и риолитового источника содержится ≥ 10 и 40% вулканического стекла соответственно.

Материал *vitric* [32] диагностируется, если выполняется одно из условий:

1. Содержит более 35% крупнозема (> 2 мм), в котором на долю пемзы и шлаков приходится $> 60\%$;
2. В гранулометрическом составе доля песчаной фракции $> 40\%$, из которой более 30% составляет вулканическое стекло или кристаллы, покрытые им [23].

Материал *allophanic* имеет плотность при полевой влажности < 0.9 г/см³ и соответствует одному из двух критериев, удовлетворяя всем критериям материала *vitric*:

1. Свежий образец (очень) низкопрочный, на ощупь жирный (за исключением некоторых песчаных почв) и нелипкий (или слабо липкий), имеет pH > 8.2 по тесту [24],
2. Фиксация фосфатов $\geq 85\%$.

Аллофановые почвы (в Soil Taxonomy им соответствуют Aquands, Cryands и Udands) диагностируют по наличию материала allophanic мощностью ≥ 35 см в пределах верхней 60 см минеральной толщи. Они содержат большое количество аморфных минералов (аллофан, имоголит и ферригидрит), имеют низкую прочность и объемную плотность, чаще всего образуются на вулканических породах и продуктах их выветривания, но встречаются также на кварц-полевошпатовых и метаморфизованных вулканических песках, продуктах выветривания граувакки и сланцев. Выделяется 4 подпорядка Аллофановых почв [26]: Типичные (развиваются на хорошо дренированном субстрате), Perch-gley, Глеевые и Impeded (плохо дренированные).

Свойство perch-gley является морфологическим показателем насыщения грунтовыми водами и уменьшения окислительно-восстановительного потенциала; его диагностируют по наличию глеевых тонов окраски: цветность (chroma) при полевой влажности ≤ 2 по шкале Манселла или 3 при светлоте (value) ≥ 6 при условии наличия глевой сегрегации. Глеевые Аллофановые почвы

характеризуются более однородной окраской, нежели Perch-Gley Allophanic Soils. Impeded Allophanic Soils выделяют, если имеется слабопроницаемый, уплотненный горизонт в пределах 90 см от поверхности минеральной части почвы [26].

Пемзовые почвы (в Soil Taxonomy им соответствуют Vitrandis, Vitricryands и Vitraquands) диагностируют по наличию материала vitric мощностью ≥ 35 см, встречающегося в пределах верхней 25–60 см почвенной толщи и выветрелого горизонта B (weathered-B horizon, или горизонта с развитой структурой или цветом по WRB [19]) мощностью ≥ 5 см. В Новой Зеландии Пемзовые почвы формируются на пемзе или вулканическом стекле возрастом 700–3500 лет, имеют низкое содержание глины, которая обычно содержит аллофан, и распространены преимущественно на Вулканическом плато (the Volcanic Plateau) Северного острова.

Пемзовые почвы представлены тремя подпорядками: Типичными, Perch-gley и Impeded [26], диагностируемыми аналогично подпорядкам Allophanic soils.

Зернистые (Granular) почвы представляют собой глинистые почвы, в которых преобладают минералы группы каолинита и вермикулита. Они формируются на очень выветрелой тэфре возрастом более 50 тысяч лет, липкие и низкопластичные. Некоторые более мелкие таксоны Зернистых почв такие, как Melanic (с мощным гумусовым горизонтом), Oxidic и Orthic характеризуются высоким содержанием аллофанов, из-за чего они также отнесены к почвам, сформированным на вулканическом материале.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИАГНОСТИКИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОЧВ

Во всех рассмотренных классификациях вулканические почвы отделяются от других почв на самом высоком таксономическом уровне. Каждая из рассмотренных классификаций использует свои методы и критерии диагностики почв, которые во многих случаях сложно сопоставимы, а иногда вообще не имеют аналогов (табл. 1). Таким образом, прямая корреляция названий вулканических почв из одной классификации в другую сложна, требует дополнительных химико-аналитических работ, а иногда невозможна.

Диагностика вулканических почв наиболее детально проработана в WRB, Soil Taxonomy и новозеландской классификации. Диагностические критерии первых двух систем хорошо сопоставимы друг с другом за исключением мощности и глубины, в которой необходимо анализировать свойства. В новозеландском подходе также используется большое число субстантивных и морфологических показателей, большая часть кото-

Таблица 1. Диагностические критерии выделения вулканических почв в различных классификациях

| Показатель | Классификация почв | | | | | | | | | |
|---|--------------------|--------|-------------|---------------|------------|----------|-----------------|------------------|----------------|----------|
| | WRB | | | Soil Taxonomy | | русская | | | новозеландская | |
| | Andosols | | | Andisols | | охристые | | | Аллофановые | |
| | Andic | Vitric | Terrestrial | A-критерий | B-критерий | типичные | светло-охристые | слоисто-пепловые | Аллофановые | Пемзовые |
| Плотность, г/см ³ | ≤0.9 | – | – | <0.9 | – | <1.0 | <1.0 | – | <0.9 | – |
| Фиксация фосфатов, % | ≥85 | ≥25 | <25 | >85 | >25 | – | – | – | ≥85 | >30 |
| Al _{ox} +1/2Fe _{ox} , % | ≥2 | ≥0.4 | <0.4 | >2 | >0.4* | >4.1 | >1.95 | – | – | – |
| Содержание вулканического стека в песчаной фракции, % | – | ≥5 | ≥30 | – | >5* | – | – | – | – | >10*** |
| Содержание C _{орг} , % | >5 | – | – | <25 | <25 | 3.0–4.6 | 1.2–2.3 | – | – | – |
| Тест на Al-органические комплексы с NaF | + | – | – | + | + | – | – | – | + | – |
| Внутренняя тиксопропность | + | – | – | – | – | + | + | – | – | – |
| Мощность соответствующего материала, см | ≥15 | ≥15 | ≥30 (≥10)** | ≥40 | ≥40 | – | – | – | ≥35**** | ≥35**** |
| Нижняя граница появления соответствующего материала, см | ≤100 | ≤100 | ≤50 | ≤60 | ≤60 | – | – | – | ≤60**** | ≤60**** |

Примечание. Полу жирным отмечены диагностические критерии. Прочерк – критерий не применяется.

* См. рис. S3.

** В случае непосредственного подстиления плотной породой, плотным техногенным, цементированным или затвердевшим материалом.

*** Только в подпорядке Terrestrial.

**** Для материала vitric или allophanic.

рых легка для диагностики в полевых условиях. Широкое распространение на территории этой страны вулканических почв определяет необходимость более детального их разделения, в отличие, например, от России, где они находятся преимущественно в малонаселенных удаленных районах. На самом верхнем иерархическом уровне российские охристые и слоисто-пепловые почвы и новозеландские аллофановые и пемзовые могут быть легко переведены в термины WRB и Soil Taxonomy, но обратный вариант затруднителен.

Хотя в российской классификации [10, 15] для выделения горизонта BAN предложены количественные критерии содержания гумуса и оксалаторастворимых Fe и Al, основная диагностика охристых и слоисто-пепловых почв строится на предположении об их формировании на вулканических породах. Но при этом используемые критерии не приводятся. Разделение типов почв (за исключением светло-охристых и охристых типичных) основано на морфологических признаках верхнего горизонта.

Некоторые рассмотренные классификации разделяют вулканические почвы на слабо- и сильновыветрелые. В WRB это Andosols с квалификаторами Tephric/Vitric/(Alu/Sil)andic, в Новозеландской классификации – Пемзовые и Аллофановые почвы. В схемах российской классификации и Soil Taxonomy такая дифференциация почв не предусмотрена.

В отличие от зарубежных классификаций, в которых вулканические почвы выделяются на основе химических свойств, в российской классификации [10, 15] преобладают морфологические диагностические критерии: количество прослоев, наличие вулканической тефры, признаки оподзоливания и т. д. Однако если пересчитать типичные для вулканических почв России содержания оксалаторастворимых Al и Fe по [10] в критерии WRB или Soil Taxonomy, то используемые пороговые значения в разы превышают необходимые для свойства Andic (табл. 1). По имеющимся данным вулканические почвы Камчатки и Курил можно классифицировать как Vitric или Silandic Andosols (табл. S9).

Так как в рассмотренных классификациях используются разные критерии, то простой переход затруднен или невозможен и приходится говорить о корреляции между названиями почв, сделанными на основе разных подходов. В отсутствии реальных морфологических описаний и химических свойств диагностических горизонтов уже на втором иерархическом уровне корреляция почв из одной национальной классификации (и WRB) в другую является весьма проблематичной задачей. В идеале для каждого разреза необходимо применить несколько классификаций, используя соответствующие диагностические критерии. Подобные проблемы в корреляции назва-

ний между различными схемами отмечались ранее, например, для почв засоленного ряда [14]. Более низкие классификационные ранги вулканических почв в WRB выделяются по характеру гумусового горизонта, степени гидроморфизма и оглеения, наличия невыветрой тефры и т. д., в Soil Taxonomy – по режимам температуры и увлажнения, в Новой Зеландии – по наличию и характеру оглеения, плотного непроницаемого субстрата, в России – по оподзоленности, слоистости, цвету и количеству элементарных профилей.

Несмотря на распространенность вулканических почв России в пределах малонаселенных и труднодоступных регионов, закономерности распространения и пространственной дифференциации морфологических свойств этих объектов изучены достаточно подробно [7, 17, 20, 28], получены данные о положительном влиянии пеплов на микроэлементный состав камчатских почв [6]. Горизонт BAN в этих почвах встречается на пеплах практически любого состава возрастом до 5 тыс. лет. При этом на преобразование субстрата в горизонт BAN требуется больше времени по мере увеличения доли SiO₂ в его составе, аридизации климата и уменьшения среднегодовой температуры. Кроме того, для Камчатки выделено 7 тефратотипов – почв со сходным набором маркирующих пепловых горизонтов, условиями формирования и морфологией современных и погребенных почвенных горизонтов [7, 13, 30, 33] – фактически серий почв по Soil Taxonomy; установлена связь между органогенными горизонтами и произрастающей растительностью [7]. При этом редки данные по важнейшим химическим диагностическим свойствам, хотя детально изучен их элементный состав, охарактеризованы провинциальные различия [5, 12]. Если по содержанию оксалаторастворимых Al и Fe имеются данные по отдельному разрезам [4, 7, 28] без привязки к актуальному делению вулканических почв на охристые типичные и светло-охристые (значение показателя $Al_{ox} + 1/2Fe_{ox}$ преимущественно варьирует в пределах 1–3%, в единичных разрезах достигая 7–10%), то опубликованные данные по удержанию фосфатов и содержанию вулканического стекла в вулканических почвах России отсутствуют.

Вулканические почвы Курильских островов остаются слабо изученными [2, 3, 20], хотя широтной дифференциации и формированию существенных отличий от почв Камчатки препятствует положение между холодным Охотским морем и Тихим океаном [11, 21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Между разными классификациями невозможно напрямую выполнить корреляцию почв на вулканических отложениях. В рассмотренных классификациях используются различные подходы к

диагностике вулканических почв за исключением WRB и Soil Taxonomy, где пороговые критерии близки на верхних таксономических уровнях, но существенно отличаются на более низких.

Диагностика вулканических почв в России и Новой Зеландии достаточно самобытна и основана во многом на подходах, отличающихся от применяемых в WRB и Soil Taxonomy, хотя в новозеландской классификации достаточно сильно влияние американских подходов. В качестве плюсов российского и новозеландского подходов можно отметить широкое использование критериев, позволяющих выполнить надежную диагностику уже в полевых условиях, в то время как в реалиях WRB и Soil Taxonomy обязательна трудоемкая и дорогостоящая лабораторная диагностика.

На наш взгляд российский подход к диагностике вулканических почв может быть усовершенствован за счет:

- использования субстантивных критериев применительно к почвообразующим породам и материалу почв (количеству вулканического стекла, скелетности и составу материала, псевдотиксотропии и т. д.);

- уточнения пороговых уровней и введения дополнительных качественных и количественных показателей (тест на Al-органические комплексы, мощность горизонта VAN и его цветность по шкале Манселла для разделения светло-охристых и охристых типичных почв, уточняющая глубина выделения трех элементарных профилей),

- использования данных о тифрастратотипах и характере вулканической активности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование поддержано МГУ им. М.В. Ломоносова (Междисциплинарная научно-образовательная школа “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и тема госзадания I.4).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Использование квалификаторов, отражающих формирование почв на вулканических отложениях, в системе WRB [16]

Таблица S2. Диагностические признаки охристых типичных и светло-охристых почв в [10]

Таблица S3. Диагностические признаки вулканических охристых оподзоленных и турбированных и слоисто-охристых почв в [10]

Таблица S4. Пороговые значения мощности и объема материала со свойствами andic или vitric, необходимые для выделения Andosols по [16]

Таблица S5. Диагностика материала tephric и свойств vitric и andic по WRB [16]

Таблица S6. Критерии свойств aluandic, silandic и alusilandic по WRB [16]

Таблица S7. Пороговые значения для критериев выделения свойства andic применительно к мелкозему (<2 мм) при условии $C_{\text{орг}} < 25 \text{ мас. \%}$ в Soil Taxonomy [36]

Таблица S8. Пороговые значения среднелетней температуры почвы на глубине 50 см для выделения режима crylic по Soil Taxonomy [29], °C

Таблица S9. Диагностические критерии (в нормальные годы) выделения режимов увлажнения udic, ustic, xeric и aridic (torric) по [29]

Рисунок S1. Зависимость между вулканическими почвами Камчатки (1 – слоисто-пепловые почвы; 2 – слоисто-охристые, 3 – светло-охристые, 4 – охристые, 5 – перегнойно-охристые, 6 – охристые подтипы вулканических почв, 7 – невулканические почвы) и коэффициентом увлажнения Иванова по [10, 17] с дополнениями.

Рисунок S2. Различия между слаборазвитыми (Regosols) и вулканическими почвами Andosols [37]. Al_p – содержание Al в пирофосфатной вытяжке Мера-Джексона.

Рисунок S3. Зависимость содержания вулканического стекла во фракции 0.02–2 мм и суммарной доли Al_{ox} и 1/2Fe_{ox} для определения свойств andic (темно-серая область) в почвах с показателем удержания фосфатов не менее 25% [29].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова М.И. Сравнение принципов, структуры и единиц классификации почв России и международной почвенной классификации // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. № 79. С. 23–35.
2. Гришин С.Ю., Баркалов В.Ю., Верхолат В.П., Рашидов В.А., Шляхов С.А., Яковлева А.Н. Растительный и почвенный покров острова Атласова (Курильские острова) // Комаровские чтения. 2009. № 56. С. 64–119.
3. Гришин С.Ю., Шляхов С.А. Растительность и почвы острова Парамушир (северные Курилы) // География и природные ресурсы. 2008. № 4. С. 96–103.
4. Захарихина Л.В. Провинции почв Камчатки, различающиеся составом и возрастом вулканических пеплов, на которых они образованы // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2009. № 2(6). С. 95–110.
5. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Химический состав почв в ареалах выпадения пеплов активных вулканов Камчатки // Почвоведение. 2016. № 3. С. 333–343.
6. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Ряховская Н.И., Гайнатулина В.В., Аргунеева Н.Ю., Макарова М.А. Особенности геохимической трансформации естественных почв и повышение продуктивности агроценозов при поступлении продуктов вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 57–57.

7. *Карпачевский Л.О., Алябина И.О., Захарихина Л.В., Макеев А.О., Маречек М.С., Радюкин А.Ю., Шоба С.А.* Почвы Камчатки. М.: ГЕОС, 2009. 224 с.
8. *Киселева И.В.* Почвы природных и антропогенных ландшафтов Камчатки. Современные исследования в естественных науках. Мат-лы II Междунар. научн. конф. 2015. С. 125–128.
9. Классификация почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1997. 235 с.
10. Классификация почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
11. *Коломыц Э.Г.* Биоклиматическая система курильских островов // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2018. № 3. С. 79–90.
12. *Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Районирование и геохимическая характеристика вулканических почв Камчатки // Геохимия. 2009. № 5. С. 490–503.
13. *Маречек М.С., Алябина И.О., Шоба С.А.* ГИС-модель почвенного покрова центральной Камчатки // Доклады по экологическому почвоведению. 2007. Т. 1. № 5. С. 20–60.
14. *Панкова Е.И., Герасимова М.И., Королюк Т.В.* Засоленные почвы в отечественных, американской и международной почвенных классификациях // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1309–1321.
15. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
16. Рабочая группа IUSS WRB. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт, исправленная и дополненная версия 2015. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт // Доклады о мировых почвенных ресурсах. 2015. № 106. Рим: ФАО. 203 с.
17. *Соколов И.А.* Вулканизм и почвообразование (на примере Камчатки). М.: Наука, 1973. 228 с.
18. *Смирнова М.А., Герасимова М.И.* Отделы в классификации почв России: оценка корректности выделения по таксономическим расстояниям // Почвоведение. 2017. № 3. С. 275–288.
19. *Таргульян В.О., Герасимова М.И.* Мировая коррелятивная база почвенных ресурсов: основа для международной классификации и корреляции почв. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. 278 с.
20. *Фураев Е.А.* Геохимия ландшафтов острова Кунашир (Курильские острова). М.: Прометей, 2013. 180 с.
21. *Урусов В.М., Варченко Л.И.* К формированию биоразнообразия Дальнего Востока России // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. Т. 19. № 1. С. 191–197. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2020038>
22. *Bonatotzky T., Ottner F., Erendsson E., Gísladottir G.* Weathering of tephra and the formation of pedogenic minerals in young Andosols, South East Iceland // Catena. 2021. V. 198. P. 105030. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105030>
23. *Eden D.N.* The standard method for determining volcanic glass content in Andisols. 1990. DSIR Land Resources Scientific Report No.2.
24. *Fields M., Perrot K.W.* The nature of allophone in soils. III. Gypsum effects on growth and subsoil chemical proprieties // Soil Sci. Soc. Am. J. 1966. V. 2. P. 623–629.
25. *Froggatt P.C., Lowe D.J.* A review of late Quaternary silicic and some other tephra formations from New Zealand: their stratigraphy, nomenclature, distribution, volume, and age // New Zealand J. geology and geophysics. 1990. V. 33. № 1. P. 89–109.
26. *Hewitt A.E.* New Zealand soil classification // Landcare research science series. Lincoln: Manaaki Whenua – Landcare Research New Zealand Ltd, 2010. № 1. 136 p.
27. Illustrated Guide to Soil Taxonomy. Lincoln: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, 2015. Version 2.0. 497 p.
28. *Ivanov A., Shoba S., Krasilnikov P.* A pedogeographical view of volcanic soils under cold humid conditions: The commander islands // Geoderma. 2014. V. 235. P. 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.031>
29. Keys to Soil Taxonomy, Soil Survey Staff. USDA, 2015. 337 p.
30. *Krashennikov S.P., Bazanova L.I., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V.* Detailed tephrochronology and composition of major Holocene eruptions from Avachinsky, Kozelsky, and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // J. Volcanology and Geothermal Research 2020. V. 408. P. 107088. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107088>
31. *Obara H., Maejima Y., Kohyama K., Ohkura T., Takata Y.* Outline of the comprehensive soil classification system of Japan—first approximation // Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ. 2015. V. 49. № 3. P. 217–226.
32. *Parfitt R.L.* A proposed classification of yellow-brown loams and yellow-brown pumice soils. I. The boundary with other soils at the highest category. NZ Soil Bureau Laboratory Report CM5, 1985. 20 p. <https://doi.org/10.7931/DL1-LAB-CM05>
33. *Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A., Bazanova L.I., Pevzner M.M., Plechova A.A., Rogozin A.N., Garbe-Schönberg D.* TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 469–486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>
34. *Semenkov I.N., Klink G.V., Lebedeva M.P. et al.* The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 11077. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90712-7>
35. *Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R.A.* Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. Amsterdam, London, New York, Tokyo: Elsevier, 1993. 288 p.
36. Soil Taxonomy. 2nd ed., Agriculture Handbook, No. 436. (U. S. Department of Agriculture, 1999).
37. *Takahashi T., Shoji S.* Distribution and classification of volcanic ash soils // Global Environ. Res. 2002. V. 6. № 2. P. 83–98.
38. *Zelenin E., Kozhurin A., Ponomareva V., Portnyagin M.* Tephrochronological dating of paleoearthquakes in active volcanic arcs: A case of the Eastern Volcanic Front on the Kamchatka Peninsula (northwest Pacific) // J. Quater. Sci. 2020. V. 35. № 1–2. P. 349–361. <https://doi.org/10.1002/jqs.3145>

Diagnostics of Volcanic Soils: a Review of Classification Schemes

M. T. Kazinskiy¹ and I. N. Semenov^{1, *}

¹ *Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, st. 1, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: semenkov@geogr.msu.ru*

In this paper, we analyzed diagnostics of volcanic ash soils in different soil classification, e.g. the USA, Russian and New Zealand classifications and the FAO-WRB. In the Russian classification of soils, the requirement diagnostic criterion for volcanic soils is the presence of specific BAN horizon with a bulk density of less than 1 g/cm³, an internal pseudohixotropy, a caviar like structure, a high content of humus and oxalate-soluble Al (10–15%), Fe (2–6%), Si (4–7%). According to the FAO-WRB and Soil Taxonomy, volcanic soils (Andosols and Andisols, respectively) are diagnosed by the presence of a high content of allophane or short-range-order materials, as well as a low bulk density (less than 0.9 g/cm³) and a high phosphate retention. In the New Zealand classification, volcanic soils (at the highest hierarchical level – Allophane and Pumice soils) form on igneous rocks, have a low bulk density, a high content of volcanic sand and a coarse fraction, and a high phosphate retention. In the field, reliable diagnostics of volcanic ash soils can be achieved based on the Russian and New Zealand classifications. The FAO-WRB and Soil Taxonomy require additional laboratory diagnostics. Direct correlation of the names of volcanic soils is possible only at the highest hierarchical level from the New Zealand and Russian schemes into the FAO-WRB and Soil Taxonomy, and between the FAO-WRB and Soil Taxonomy. Although, it is necessary to have morphological descriptions of soil profiles and analytical results due to the differences in the threshold values used.

Keywords volcanic ash soils (Andosols), allophane, tephra, pyroclastic material, weathering, Kamchatka, soil diagnostics