

ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗ И ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ

УДК 631.4:551.311.23(712.1)

ОСОБЕННОСТИ ВЫВЕТРИВАНИЯ ПОЧВ, СФОРМИРОВАННЫХ
НА ПЕПЛАХ (р. Белая, территория Юкон, Канада)

К. Э. С. Смит, Ч. Л. Пинг*, К. А. Фокс**, Е. Кодама***

Тихоокеанский научный центр Министерства сельского хозяйства и продовольствия, Вайтхорс, Юкон, Канада

** Научный центр Университета Аляски, Пальмер, Аляска, США*

*** Научный центр сельского хозяйства и продовольствия по контролю за пестицидами, Лондон, Онтарио, Канада*

**** Восточный центр сельского хозяйства и продовольствия по зерновым и масличным культурам, Оттава, Канада*

Изучены почвы на вулканических пеплах (тефрах) позднего голоцена (возраст 1800 и 1150 лет), сформированные в холодном сухом климате. Под ненарушенным лесом они подстилаются многолетней мерзлотой в пределах 1 м от поверхности. Почвенный профиль включает слои погребенной лесной подстилки и грубой пеплово-пемзовой липарит-дацитовый тефры мощностью до 60 см. Некоторые горизонты по количеству вулканического стекла, поглощению фосфора и содержанию оксалатнорастворимых Fe и Al удовлетворяют критериям свойств андик в таксономии почв США, однако мощность профилей не позволяет ни один из них классифицировать как андисоль. В минералогическом составе горизонтов, сложенных тефрой, преобладает вулканическое стекло; в меньших количествах содержатся плагиоклазы, микроклин и амфиболы. Некоторые поверхностные горизонты содержат слоистые силикаты и кварц, что говорит о привносе лесового материала. Микроморфологическое изучение показало небольшую корродированность зерен стекла и полевых шпатов и слабо выраженные признаки вторичного глинообразования. По-видимому, режим выветривания этих почв таков, что аллофаны в них еще не сформировались. Согласно большинству классификаций, применяемых к почвам на многолетней мерзлоте, рассмотренные педоны принадлежат к различным семействам или подгруппам вулканических криосолов (гелисолов).

Вечная мерзлота, почвы, криосолы, тефра, выветривание

WEATHERING CHARACTERISTICS OF THREE PEDONS FORMED
IN WHITE RIVER TEPHRA, YUKON TERRITORY, CANADA

C. A. S. Smith, C. L. Ping*, C. A. Fox**, E. Kodama***

Pacific Agri-Food Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Whitehorse, YT, Canada

** Palmer Research Centre, University of Alaska Fairbanks; Palmer, AK, USA*

*** Pest Management Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, London, ON, Canada*

**** Eastern Corn and Oilseeds Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, ON, Canada*

Soils formed on two Late Holocene volcanic tephra (1800 and 1150 years BP) under a cold, dry climate were examined to evaluate trends in soil weathering. Under mature forest cover, these soils are underlain by permafrost within one metre of the soil surface. The soils are composed of buried forest floor materials and layers of coarse ashy-pumiceous rhyodacite tephra up to 60 cm thick. Several soil horizons met glass composition, P retention and oxalate-extractable Fe and Al criteria established for andic soil material but, according to Soil Taxonomy, none of the profiles had a thick enough development to be classified as Andisols. The mineralogy of the tephra-derived horizons was dominated by volcanic glass with lesser amounts of plagioclase, microcline and amphibole. Some surface horizons contained phyllosilicates and quartz as the result of loess inputs. Micro-morphological investigation showed minor pitting of glass and feldspar grains, little evidence of secondary clay formation. Initial interpretation of the weathering regime of the soils is that no allophane has yet formed in the soils. The soils belong to various families or subgroups of tephritic Cryosols (Gelisols) in major soil taxonomies used for permafrost-affected soils.

Permafrost, soil, Cryosol, tephra, weathering

ВВЕДЕНИЕ

В разрезе голоценовых осадков Кордильер Западной Канады выделяются несколько слоев вулканического пепла (тефры), отражающих крупные извержения вулканов на территории Британской Колумбии, штатов Вашингтон, Орегон и Аляска. Применительно к почвам, сформированным на тефре или пирокластических материалах, обычно используют термин „пепловые почвы“ (volcanic ash soils). В Канаде распространение таких почв ограничено территориями, прилегающими к вулканам в Кордильерах Британской Колумбии и Юкона. В большинстве случаев тефра присутствует в верхней части профиля почв в виде маломощного (10 см) слоя. Она оказывает влияние на почвенные процессы, но не может считаться почвообразующей породой, так как ее мощность слишком мала. О почвообразовании на тефре можно говорить лишь применительно к району реки Белая на юге Юкона, где на большой территории выдержана значительная мощность пепловых отложений. Причина этого явления состоит в наложении двух горизонтов вулканического пепла, имеющих по данным радиоуглеродного анализа возраст 1147 и 1800 лет [Clague et al., 1995]. Пеплы р. Белая — это 25 км³ пирокластических отложений [Lerbekmo et al., 1975], покрывающих в Южном Юконе более 300 000 км² (рис. 1). Липарит-дацитовый пепел выпал на территорию с островной вечной мерзлотой [Hughes, 1990] и развитой на ней почвенной комбинацией брунисолей и

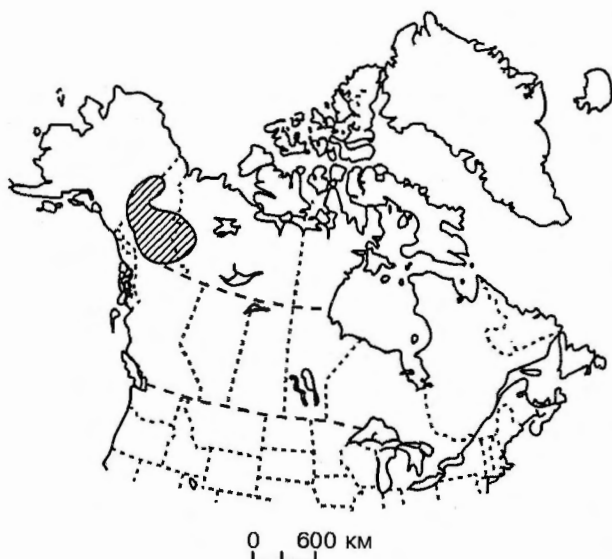


Рис. 1. Распространение тефры в районе р. Белая (территория Юкон, Канада).

Штриховкой показан ареал распространения пепловых отложений в районе р. Белая.

криосолей [White, Smith, 1992]. Минералогически он представлен вулканическим стеклом, плагиоклазом (андезином), роговой обманкой, гиперстеном и магнетитом [Lerbekmo, Campbell, 1969]. Доля вулканического стекла возрастает с удалением от источника пепла — горы Бона в хребте Аляска.

Варьирующая гранулометрия, присутствие стекла, высокая порозность и водопроницаемость вулканического пепла способствуют выветриванию и взаимодействию его продуктов при почвообразовании. Вулканическое стекло обнаруживает низкую устойчивость к разрушению. Быстрое выветривание способствует образованию уникальных сочетаний физических и химических свойств [Dahlgren et al., 1993], которые характеризуют почвенный порядок андисоли [Soil Survey Staff, 1996].

Цель настоящей статьи — охарактеризовать степень выветренности позднеголоценового пепла в условиях холодного сухого климата, а также морфологию и генезис криосолей, сформировавшихся в результате такого выветривания и являющихся уникальными для всей Канады.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования. Район проведения почвенных исследований расположен на территории Юкон, занимающей северо-запад Канады. Более древние отложения тефры соответствуют вытянутому на север от вулкана, вдоль границы Юкона и Аляски, ареалу пеплопада. Более молодые отложения занимают большую площадь и соответствуют ареалу, вытянутому на восток (см. рис. 1). Само жерло вулкана, предположительно закрытое в настоящее время ледником, расположено близ горы Бона у границы Юкона и Аляски. Для исследования выбраны три точки в районе р. Белая, в области перекрытия пепловых ареалов. Тефра имеет светло-серую окраску (10YR 7/2), в ее составе преобладает бесцветное стекло; содержание мафических минералов невелико.

Два педона располагались под ненарушенным зеленомошным черноельником (*Picea mariana* (Mill.) BSP), где кровля вечной мерзлоты залегает на глубине не более 65 см. Третий педон был рассечен при срезе отложений, сделанном во время строительства дороги, и описан в стенке среза. В последнем случае кровля мерзлоты опускалась ниже пределов профиля почвы, что позволило обследовать почвообразующую породу до глубины 155 см.

Район исследования характеризуется среднегодовой температурой воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и годовым количеством осадков 350 мм, большая часть которых выпадает в летние месяцы в виде дождя.

Зимы холодные и сухие, малоснежные, в результате чего промерзание грунта происходит довольно быстро. Под сравнительно сомкнутым зрелым еловым древостоем развит мощный напочвенный покров, образованный в основном зелеными мхами; он выполняет функцию теплоизолятора и тем самым способствует сохранению малой мощности деятельного слоя. О. Л. Хьюгс [Hughes, 1990], характеризуя мерзлотные условия территории, указывал на сплошное распространение мерзлоты на склонах северной экспозиции и в днищах долин, выполненных тонкими мелкоземистыми отложениями. К. Р. Берн [Burn, 1995] установил, что мощность мерзлоты в окрестностях оз. Айшихук составляет около 25 м; данное место отстоит от района нашего исследования примерно на 100 км, но относится к тому же экорегиону.

Аналитические методы. Отбор проб, описание и наименование горизонтов проводились по стандартам канадской классификации почв [Agriculture Canada Expert Committee..., 1987]. Полевой объемный вес определялся в буровых образцах. Образцы для лабораторных анализов высушивали и просеивали через сито для удаления грубых частиц.

В аналитических лабораториях Министерства сельского хозяйства Канады в Оттаве проводили определение общего органического углерода в органогенных почвенных горизонтах путем сжигания в индукционной печи Лесо и гранулометрического состава пипет-методом после физической диспергации [Sheldrick, 1984]. Дополнительные анализы были выполнены в Пальмерском исследовательском центре университета Аляски по методам Службы охраны почв США [Soil Conservation Service, 1984]: рН в H₂O (1:1), органический углерод в минеральных горизонтах методом мокрого сжигания по Уокли-Блэку, емкость катионного обмена и обменные катионы (извлечение 1N ацетатом аммония с последующим определением отгонкой и атомно-адсорбционным методом соответственно). Оксалатнорастворимые Al, Fe и Si, а также поглощение фосфатов определялись по [Blackmore et al., 1981].

Для минералогического анализа методом рентген-дифрактометрии (XRD) были выбраны шесть почвенных образцов. Каждый образец гомогенизировали путем перемешивания, после чего брали навески в 1—2 г, которые измельчали в мельнице-миксере SPEX до состояния пудры, пригодной для XRD-анализа (диаметр частиц менее 45 мкм). Из основных горизонтов педонов 260 и 262 в поле были отобраны ориентированные ненарушенные образцы-монолиты, которые высушивали и пропитывали полиэстерной смо-

лой, согласно методике (84-047) Б. Н. Шелдрика [Sheldrick, 1984]. Шлифы (2 × 4 см) описывали под микроскопом Leitz Otholux II P1-BK, в основном пользуясь терминологией, разработанной Р. Брюером [Brewer, 1976] и П. Баллоком с соавторами [Bullock et al., 1985].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические свойства. Педон 260 включает лесную подстилку, под которой залегают 18 см пеплово-пемзовой тефры (горизонт р. Белая), относящейся ко второму извержению (1150 лет назад). Тефра, в свою очередь, перекрывает погребенный органогенный горизонт, предположительно — подстилку и напочвенный покров, существовавшие до пеплопада. Кровля вечной мерзлоты залегает на глубине 57 см от поверхности.

Педон 261 также находится под лесом. В нем описаны перегнойные горизонты Ah1 и Ah2, образованные перемешиванием пылевато-песчаного материала с хорошо разложившимся органическим веществом. Кровля мерзлоты найдется на глубине 62 см от поверхности. Погребенная подстилка в пределах деятельного слоя

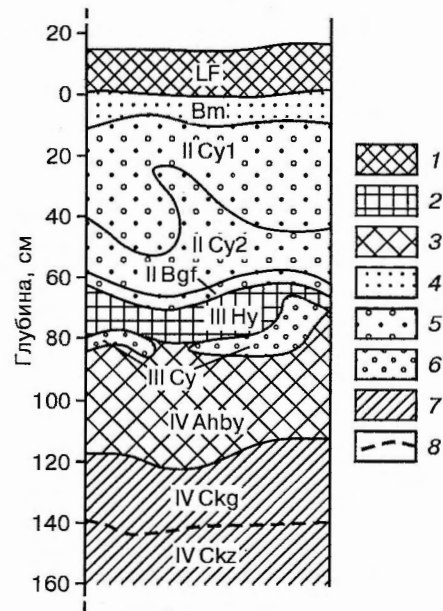


Рис. 2. Схема строения профиля педона 262.

1 — современная лесная подстилка; 2 — органогенный горизонт, погребенный пеплопадом 1150 лет назад; 3 — органогенный горизонт, погребенный пеплопадом 1800 лет назад; 4 — лесс; 5 — пеплово-пемзовые вулканические отложения возраста 1150 лет; 6 — пепловые вулканические отложения возраста 1800 лет; 7 — подстилающий карбонатный пылеватый суглинок; 8 — положение кровли многолетней мерзлоты на момент исследования.

ОСОБЕННОСТИ ВЫВЕТРИВАНИЯ ПОЧВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ПЕПЛАХ

Таблица 1. Выборочная аналитическая характеристика трех почв, сформированных на отложениях с участием вулканического пепла

Горизонт	Глубина, см	Класс механического состава	Объемный вес, г/см ³	pH (H ₂ O)	C _{орг} , %	ЕКО (pH 7,0) смоль(+)/кг	Si _о , %	Fe _о , %	Al _о , %	Al _о + 0,5Fe _о , %	Поглощение, P
<i>Педон 260</i>											
F1	26—18		—	5,5	28,7	80,8	0,07	0,44	0,09		7
F2	18—9		—	5,0	29,7	119,4	0,08	0,63	0,19		33
H	9—0		0,38	6,8	18,8	102,6	0,19	1,13	0,44	1,01*	63
Bm	0—8	Крупный песок	0,71	7,2	0,7	4,2	0,03	0,07	0,02		9
C	8—18	»	0,67	7,6	0,2	1,5	0,03	0,06	0,03		2
IIAhb	18—31	Пылеватый суглинок	—	7,4	11,5	80,8	0,18	1,13	0,32	0,88	60
<i>Педон 261</i>											
L	16—13		—	6,5	25,8	63,0	0,09	0,43	0,11		1
F	13—0		—	4,8	26,3	99,0	0,04	0,43	0,17		Следы
Ah1	0—6	—	—	5,8	14,3	83,4	0,16	1,16	0,44	1,02	66
Ah2	6—9	—	0,66	5,8	6,2	38,1	0,50	1,29	0,50	1,15	
Bmy	9—12	Пылеватый суглинок	—	6,1	2,9	16,2	0,07	0,28	0,14		23
Bmgjy	12—32	Крупный песок	0,82	6,7	0,5	2,6	0,06	0,09	0,04		1
Cy	32—38	»	0,79	7,2	0,3	1,7	0,03	0,07	0,03		<1
Syz	38—46	»	—	—	0,3	—	—	0,09	0,03		Следы
<i>Педон 262</i>											
LF	15—0		—	—	20,4	—	—	—	—		
Bm	0—8	Пылеватый суглинок	—	5,9	4,0	30,1	0,33	1,47	0,51	1,25	53
IIICy1	8—35	Крупный песок	—	6,9	0,6	2,0	0,03	0,16	0,03		13
IIICy2	35—60	»	—	7,3	0,2	1,3	0,01	0,05	Следы		<1
IIIBgf	60—63	»	—	7,4	0,4	3,1	0,03	0,38	Следы		14
IIINy	63—78	—	—	7,2	19,0	12,3	0,09	1,12	0,34		78
IIICy	78—82	Пылеватый суглинок	—	7,3	3,2	21,8	0,03	0,46	0,07		22
IVAhby	82—120	»	—	7,3	9,9	72,3	0,27	1,7	0,44	1,6	67
IVCkg	120—140	»	—	7,4	0,9	10,4	0,1	0,77	0,11		22

Примечание. По стандартам американско-канадской почвенной школы за нулевую отметку профиля принимается не дневная поверхность, а верхняя граница минеральных горизонтов.

* Значения приводятся только для горизонтов, удовлетворяющих критериям материала андик.

отсутствует, но имеет место криотурбированная пеллово-пемзовая тефра (32 см).

Педон 262 расположен вблизи педона 261; он был вскрыт срезом грунта при строительстве дороги. Обнажение почвенного материала вызвало интенсивное таяние мерзлоты и дало возможность описать последовательность из нескольких почвенных профилей до глубины 155 см (рис. 2). Здесь ниже лесной подстилки залегают 8 см пылеватого лесса. Под лессом лежат 55 см вулканического пепла, причем нижние 3 см имеют пятнистую окраску, вызванную движением грунтовых вод над погребенной гумусированной и спрессованной подстилкой, мощность которой 15 см. Особый интерес представляет 5-сантиметровый прослой пылеватого пепла, видимо, соответствующий северной оси пеплопада более ран-

него из двух извержений (1800 лет назад). Этот прослой перекрывает второй погребенный обогащенный органическим веществом горизонт, имеющий мощность около 40 см. Последний подстилался оглеенным карбонатным пылеватым суглинком, предположительно эолового генезиса, который служит почвообразующей породой. Профиль нарушен криотурбациями, выраженными в деформациях и разрывах горизонтов.

Физические и химические свойства почв представлены в табл. 1. Для трех изученных педонов характерно наличие в верхних частях профилей мощных (15—30 см) горизонтов лесной подстилки, формировавшейся на протяжении последних 1100 лет. Горизонты II Ahb в педоне 260 и III Ny в педоне 262 (см. рис. 2) представляют собой мортмассу, аккумулярованную

ную на поверхности за 600 лет, прошедшие после пеплопада раннего извержения. В отличие от этого, более мощный горизонт IV Ah_hу педона 262 соответствует аккумуляции мортмассы со времени отступления последнего поздневисконсинского ледника (более 8000 лет) до первого извержения (1800 лет).

Все обогащенные органическим веществом горизонты имеют высокую водоудерживающую способность и низкий объемный вес. Тефровые горизонты сложены материалом, в котором во фракции >2 мм преобладает пемза, а во фракции <2 мм — грубые песчаные частицы. Подобное распределение гранулометрического состава по фракциям типично для тефры, выпадающей вблизи источника вдоль центральной оси ареала пеплопада [Shoji et al., 1993]. Вулканический пепел в горизонте III C_u педона 262 имеет заметно более тонкий состав (пылеватый суглинок), что отражает положение этого участка на периферии северной части ареала пеплопада более древнего извержения в направлении его северной оси. Все проанализированные пепловые горизонты имели объемный вес менее 0,85 г·см⁻¹ и очень низкое содержание гигроскопической влаги, что типично для сравнительно молодых тефровых отложений [Nanzyo et al., 1993; Cook et al., 1980].

В верхних органических горизонтах всех педонов величины pH соответствуют среднекислой области, с глубиной они возрастают. Почва педона 261 более кислая, значения pH не превышают 6,0 на всем протяжении профиля, а в почвообразующей породе pH >7,0. В настоящее время лессы в этом регионе лишь слабо карбонатны, однако степень насыщенности почвенного поглощающего комплекса высока, и обменные основания присутствуют во всех горизонтах.

Содержание углерода максимально в слабо-разложившихся подстилках (>20 %). В обогащенных органическим веществом погребенных горизонтах оно также высокое (9,9—19,0 %), однако здесь, вероятно в результате отложения лесса на поверхность органического горизонта,

повсеместно присутствует значительная примесь минерального материала. Криотурбации в данных профилях в разной степени перемешивают органический материал и нарушают залегание горизонтов. Проанализированные образцы пепловых прослоев содержат небольшие количества органического углерода или не содержат его совсем. С содержанием органического вещества тесно коррелируют значения емкости катионного обмена; в пепловых горизонтах они наименьшие (≤10 смоль(+)/кг почвы).

Для определения количеств „активных“ компонентов или продуктов выветривания (некристаллических алюмосиликатов или металлоорганических комплексов) использовали данные анализа оксалатной вытяжки. С помощью определенных критериев в почвах оценивались количество и минералогический состав аморфных (неокристаллизованных) минералов — алюмосиликатов ближних порядков, таких как аллофаны и имоголит [Wada, 1987; Parfitt, 1983]. Данные по концентрации алюминия и железа в кислой оксалатной вытяжке (Al₀ и Fe₀) использовали для оценки содержания аморфных форм этих элементов — как связанных с органическим веществом, так и минеральных.

Аллофаны имеют атомное отношение Al:Si от 1 до 2, а имоголит — близкое к 2,0 [Henmi, Wada, 1976]. В рассматриваемых же почвах это отношение меньше 1, и оксалатнорастворимый кремний (Si₀), скорее всего, представлен преимущественно аморфной формой, образующейся в горизонтах, сложенных тефрой, при выветривании вулканического стекла. При этом в большинстве образцов содержания Al₀ и Si₀ были так низки (<0,05 %), что надежная оценка количества аллофанов не представлялась возможной. Независимо от величины отношения Al:Si, аллофановые минералы практически не образуются в богатых органическим веществом горизонтах. Причина этого в формировании комплексов аморфных форм металлов с гумусом [Dahlgren et al., 1993]. Образование аллофанов наиболее вероятно в минеральных горизонтах, где имеются

Таблица 2. Минеральный состав отдельных горизонтов по данным рентгенодифрактометрического анализа

Педон	Горизонт	Глубина, см	Амфиболы	Микроклин	Плагиоклазы	Вулканическое стекло	Слоистые силикаты	Кварц	Другие
260	Вп	0—8	Содоминирует	Содоминирует	Много	Много	Не обн.	Не обн.	Оливин
	С	8—18	Много	Много	Содоминирует	Содоминирует	»	»	
262	Вп	0—8	Мало	Мало	Мало	Много	Мало	Доминирует	Оливин + гетит
	II C _u 1	8—35	Содоминирует	Содоминирует	Много	»	Не обн.	Не обн.	
	II Bgf	60—63	Много	Много	Доминирует	»	»	»	
	III C _u	78—82	Мало	Не обн.	Мало	Доминирует	»	»	

ОСОБЕННОСТИ ВЫВЕТРИВАНИЯ ПОЧВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ПЕПЛАХ

Таблица 3. Классификация почв трех педонов по классификационным системам Канады, США и Мировой базы данных по почвенным ресурсам (WRB)

Педон	Канада	США	WRB
260	Ортик Эутрик Статик Криосол, пеплово-шлаковый (Orthic Eutric Static Cryosol)	Витрандик Ортогаппель (Vitrandic Orthohaple)	Тэфрик Гаплик Криосол (Tephric Haplic Cryosol)
261	Ортик Дистрик Турбик Криосол, пепловый (Orthic Dystric Turbic Cryosol)	Витрандик Гаплотурбель (Vitrandic Haploturbel)	Тэфрик Турбик Криосол (Tephric Turbic Cryosol)
262	Гистик Эутрик Турбик Криосол, пепловый (Histic Eutric Turbic Cryosol)	Витрандик Гаплотурбель (Vitrandic Haploturbel)	Тэфрик Турбик Криосол (Tephric Turbic Cryosol)

измеримые количества Si_0 (>0,10 %). Этому условию удовлетворяют лишь два погребенных горизонта Ah (IIAhb в педоне 260 и IVAhbu в педоне 262) (табл. 2). Если учесть, что в ненарушенных почвах оба они залегают на кровле мерзлоты или вблизи нее, то становится ясно, что формирование аллофанов сведено здесь к минимуму или отсутствует совсем.

Для определения количества продуктов выветривания в вулканическом пепле обычно используют новозеландский тест на поглощение фосфатов, который принят в качестве критерия почвенных свойств андик [Leamy, 1988] — совокупности диагностических признаков порядка андисолей в американской таксономии [Soil Survey Staff, 1996]. Для соответствия почвы этому критерию в ее составе должно преобладать вулканическое стекло, и величина поглощения фосфатов должна быть выше 25 % при $Al_0 + 0,5Fe_0 > 0,40$ %. В рассматриваемых педонах этим условиям удовлетворяют большинство горизонтов Ah и горизонт Bm педона 262 (табл. 3).

Минералогия и микроморфология почв. Минералогические анализы проводились в нескольких образцах с целью установления доли неокристаллизованных компонентов, признаков образования вторичных глин и характеристики основного материала. Было проанализировано шесть образцов из горизонтов, представляющих более молодую и более древнюю тефры, а также смешанный лессовый образец из педонов 260 и 262. Результаты рентгенодифракционного анализа приведены в табл. 2. Основные компоненты минералогического состава во всех исследованных образцах: вулканическое стекло, плагиоклазы, амфиболы. Повсюду, за исключением более древней тефры (IIIСу, педон 262), присутствует также микроклин. Слоистые силикаты (вермикулит, хлорит и слюда), а также кварц, обнаружены лишь в самом верхнем минеральном горизонте (Bm) педона 262. Поскольку ни кварц, ни слоистые силикаты не входят в состав тефры, это говорит о том, что данный горизонт представляет собой смесь тефры с перекрывающим ее лессовым материалом. В невыветренных более

молодых пепловых отложениях (горизонт С педона 260) преобладают полевые шпаты и аморфные соединения. В отличие от этого, древняя тефра (IIIСу, педон 262) характеризуется преобладанием вулканического стекла. Это подтверждает предположение о том, что материал принадлежит к северной оконечности ареала пеплопада более раннего из двух извержений, где пепел вполне мог содержать больше стекла, чем пепел, выпадавший ближе к центральной оси ареала [Lerbekmo et al., 1975].

Микроморфологическое исследование было предпринято с целью выявления признаков выветривания вулканического стекла и минеральных зерен. Изучение более молодой тефры в пределах горизонта Bm педона 260 показало, что в матрице почвы преобладают округлые или близкие к округлым частицы стекла с диаметром, варьирующим от 400 до 2000 мкм (рис. 3, а). Кроме того, присутствуют четко распознаваемые кристаллические обломки полевых шпатов (часто зональных, с отчетливым двойникованием), амфиболов (роговая обманка) и оливина. Немногочисленные признаки выветривания полевых шпатов проявляются в пелликулярной структуре зерен и отдельных коррозионных пятнах на внутренних поверхностях — следах растворения. Внутрипочвенное выветривание частиц вулканического стекла выражено в повсеместном присутствии кутан бурого (с примесью окислов железа) аморфного силикатного материала и нередко — в наличии выветренных участков шириной до 40 мкм по краям частиц.

Характерная для более древнего пепла (горизонт IIIСу педона 262) слабовыраженная микротекстура фрагмоидально-порфироскелетного типа образована очень мелкими зернами вулканического материала, перемешанными с органическими тканями и минеральными фенокристаллами чаще всего полевых шпатов и амфиболов (см. рис. 3, б). Видимо, матрикс данной почвы подвергается действию криогенных процессов, в ходе которых в отдельные его зоны включаются органические фрагменты. Он отличается слабовыраженной кольцевой ориенти-

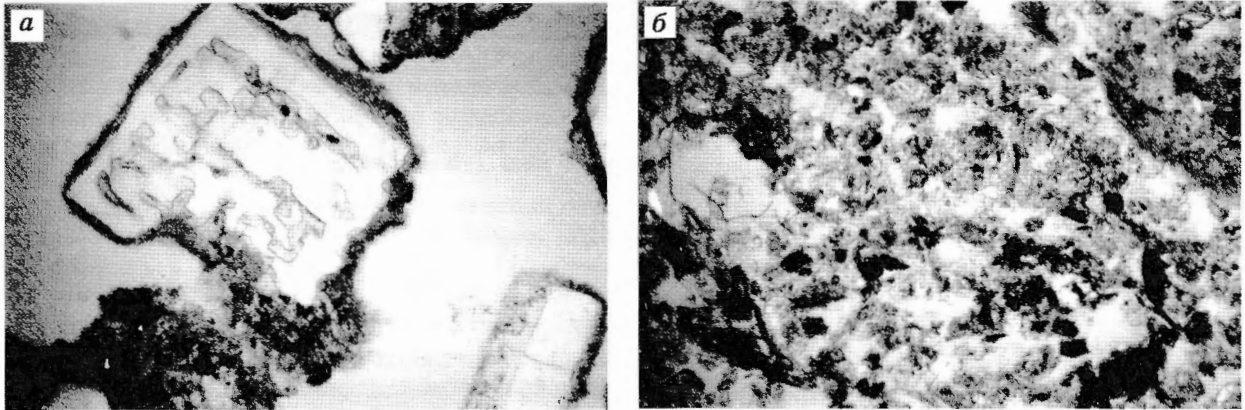


Рис. 3. Микростроение горизонтов, сложенных пепловыми отложениями. Длина окна 1 мм.

a — горизонт Bm педона 260; *б* — горизонт IIIcу педона 262.

ровкой минеральных зерен и полосчатой структурой, а также горизонтальной слоистостью, свидетельствующей о формировании линз льда. Все эти особенности характерны для почв, подверженных промерзанию—протаиванию в присутствии вечной мерзлоты [Tarnocai et al., 1993; Fox, Protz, 1981].

ВЫВОДЫ

Стратиграфия и выветривание. Формирование вышеописанных почв происходило в голоцене, в условиях продолжающихся по сей день криогенных процессов при отложении лесса и тефры. Каждый пеплопад погребал мощный моховой напочвенный покров и лесную подстилку. Около 1800 лет назад на участок выпало 5—10 см тефры, представленной преимущественно вулканическим стеклом с размерами частиц, соответствующими пылевой фракции. Эта тефра погребла относительно мощный органоаккумулятивный горизонт. В течение последующих 600 лет на выпавшем пепле развивалась новая подстилка. Примерно 1150 лет назад второй горизонт подстилки был также погребен под 60 см пеплово-пемзовой тефры. Позднее образовался горизонт Bm смешанного минералогического состава, включающий как местный материал, так и переработанную тефру р. Белая; на его поверхности формируется лесная подстилка (LF), соответствующая современному биоценозу. Многолетняя мерзлота присутствовала на всех этапах почвообразования и вызывала криотурбационное перемешивание отложений, в ходе которого нижний пепловый горизонт был деформирован и местами разорван. До строительства дороги кровля мерзлоты в педоне 262 находилась на глубине 40—80 см от поверхности грунта, с чем связана

сильная криотурбированность этой части профиля (см. рис. 2).

Скорость выветривания сильно зависит от особенностей тефры, истории формирования отложений и климатических условий. С. Шой с соавторами [Shoji et al., 1982] приводят ряд формул для оценки скорости химического выветривания и аккумуляции гумуса. В формулах используется такой показатель как возраст почвы, приведенный к 10 °С, т. е. число месяцев со средней температурой >10 °С, выраженное в годах. Согласно расчетам по этой методике со времени отложения более молодого пепла прошло только 300 нормализованных относительно 10 °С лет, в то время как для формирования количества оксалатнорастворимых алюминия и железа, удовлетворяющих критерию андик, требуется 1280 нормализованных относительно 10 °С лет выветривания.

Преобладание бесцветного вулканического стекла ($n = 1,51$) [Lerbekmo, Campbell, 1969] способствует большей устойчивости рассматриваемого пепла по сравнению с базальтовыми тефрами. Скорость химического выветривания в почвах, развитых на аналогичном бесцветном липарит-дацитовом пепле, в 1,5—2,0 раза ниже, чем в почвах на тефре, обогащенной цветным стеклом (базальтовая тефра) [Shoji et al., 1993].

В исследуемых педонах неплохо проявляется гумусообразование, причем гумус накапливается в результате его связывания с алюминием. В условиях холодного и среднего термического режимов для накопления 0,82 % пиррофосфатнорастворимого Al в гумусовом горизонте андисолей Японии требуется 360 лет. В описываемых же почвах, формирующихся в условиях пергелического режима, после 300 лет выветрива-

ния содержание аморфного алюминия ни в одном из горизонтов даже не приближается к 0,82 %. Ч. Л. Пингом с соавторами [Ping et al., 1988] показано образование аллофанов в почвах Алеутских островов, сформированных в прохладном, но очень влажном климате. В шлифах изучаемых почв сильное химическое изменение стекла или минеральных зерен не обнаружено, что говорит о крайне слабом протекании выветривания. Присутствие легкоразрушаемого оливина, видимого в шлифах и определяемого рентген-дифрактометрическим анализом, подтверждает тезис о необходимости значительно большего времени и значительно более высокой температуры для появления в измеряемых количествах продуктов внутрпочвенного выветривания.

Классификация почв. В последнее время предпринимаются усилия по созданию и совершенствованию классификации мерзлотных почв. В вышеописанных профилях имеются и вечная мерзлота, и вулканический пепел в качестве почвообразующей породы. При этом количество оксалатнорастворимых форм железа и алюминия в большинстве горизонтов недостаточно для отнесения данных почв к андосолям, поэтому они классифицируются в пределах порядков, установленных для мерзлотных почв. По новому изданию американской таксономии они, вероятно, будут относиться к порядку гелисолей, в настоящее время предложенному Д. Бокхеймом [Bockheim, 1996]. В последней версии канадской классификации [Agriculture Canada Expert Committee..., 1997] присутствие вулканического пепла рассматривается на уровне семейства. В разрабатываемой же международной системе WRB (Мировая база данных по почвенным ресурсам) эти почвы будут классифицироваться как криосоли [Tarnocai, 1997].

Во всех упомянутых системах на втором сверху таксономическом уровне принимается во внимание присутствие криотурбаций. В табл. 3 перечислены названия почв по трем классификациям. Почва педона 262 классифицируется как Гистик Эутрик Турбик Криосол (Histic Eutric Turbic Cryosol) по канадской системе, Витрандик Гаплотурбель (Vitrandic Haploturbel) по таксономии США и Тэфрик Турбик Криосол (Tephric Turbic Cryosol) по системе WRB.

Литература

- Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. The Canadian system of soil classification (2nd edition). Ottawa, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, 1987, publ. 1646, 164 p.
- Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. The Canadian system of soil classification (3rd edition). Ottawa, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, 1997 (in press).
- Blackemore L. C., Searle P. L., Daly B. K. Soil Bureau laboratory methods: A. Methods for chemical analysis of soils // Sci. Rep. 10A. New Zealand, Lower Hutt, Revised ed. New Zealand, Soil Bureau, 1981.
- Bockheim J. G. Circular letter № 5. International Committee on Permafrost-Affected Soils (ICOMPAS) USDA Natural Resources Conservation Service. USA, NE, Lincoln, 1996, 30 p.
- Brewer R. Fabric and Mineral Analysis of Soil. 2nd Edition. New York, Huntington, Kreiger Publishing Co, 1976, 482 p.
- Bullock P., Fedoroff N., Jongerius A. et al. Handbook for thin section description. England, Wolverhampton, Waine Research Publications, 1985, 152 p.
- Burn C. R. Permafrost investigations in the Aishihik Lake area // Environmental Impact Assessment for the Aishihik Lake water license renewal. Yukon, Whitehorse, Indian and Northern Affairs Canada, 1995, 10 p.
- Clague J. J., Evans S. G., Rampton V. N., Woodsworth G. J. Improved age estimates for the White River and Bridge River tephra, western Canada // Can. J. Earth Sci., 1995, 32, p. 1172—1179.
- Cook R. J., Barron J. C., Papendick R. L., Williams G. J. Impact on agriculture of the Mount St. Helens eruptions // Science, 1980, 211, p. 16—22.
- Dahlgren R., Shoji S., Nanzyo M. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils // Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science, Amsterdam, Elsevier Science, 1993, 21, 312 p.
- Fox C. A., Protz R. Definition of fabric distributions to characterize the rearrangement of soil particles in the Turbic Cryosols // Can. J. Soil Sci., 1981, 61, p. 29—34.
- Henmi T., Wada K. Morphology and composition of allophane // Amer. Mineral., 1976, 61, p. 379—396.
- Hughes O. L. Surficial Geology and geomorphology, Aishihik Lake, Yukon Territory // Geol. Surv. Can. Paper 87-29, Ottawa, 1990, 23 p.
- Leamy M. L. Circular letter № 10. International committee on the classification of Andisols (ICOMAND). New Zealand Soil Bureau, 1988.
- Lerbekmo J. F., Westgate J. A., Smith D. G. W., Denton G. H. New data on the character and history of the White River volcanic eruption, Alaska // Quaternary Studies / Suggate R. P., Cresswell M. M. (Eds). Wellington, The Royal Society of New Zealand, 1975, p. 203—209.
- Lerbekmo J. F., Campbell I. A. Distribution, composition and source of the White River Ash, Yukon Territory // Can. J. Earth Sci., 1969, 6, p. 109—116.
- Nanzyo M., Dahlgren R., Shoji S. Chemical characteristics of volcanic ash soils // Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science. Amsterdam, Elsevier Science, 1993, 21, 312 p.
- Parfitt R. L. Identification of allophane in Inceptisols and Spodosols // Soil Taxonomy News, 1983, 5, p. 11—18.
- Ping C. L., Shoji S., Ito T. Properties and classification of three pedons from the Aleutian Islands and Alaska Peninsula, Alaska // Soil Sci. Soc. Amer. J., 1988, 52, p. 455—462.
- Sheldrick B. N. Analytical methods manual. Ottawa, Agriculture Canada, Land Resource Research Institute, 1984, contrib. № 84-30.
- Shoji S., Dahlgren R., Nanzyo M. Classification of volcanic ash soils // Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science. Amsterdam, Elsevier Science, 1993, 21, 312 p.
- Shoji S., Fujiwara Y., Yamada I., Saigusa M. Chemistry and clay mineralogy of Ando soils, brown Forest Soils and Podzolic Soils formed in recent Towada ashes, northeastern Japan // Soil Science, 1982, 133, p. 69—86.
- Soil Conservation Service. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey // USDA-SCS Soil Survey

Investigations Report, № 1. Washington, D.C. US Government Print Office, 1984.

Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy 7th Edition. Washington, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 1996, 643 p.

Tarnocai C. System for the classification of Cryosolic (permafrost) soils (draft) // Proposal submitted to World Reference Base for Soil Resources, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1997, 15 p.

Tarnocai C., Smith C. A. S., Fox C. A. Guidebook to international tour of permafrost affected soils: Yukon and Northwest

Territories of Canada. Ottawa, Agriculture and Agri-Food Canada, Research Branch, 1993, 197 p.

Wada K. Minerals formed and mineral formation from volcanic ash by weathering // Chemical Geology, 1987, 60, p. 17—28.

White M. P., Smith C. A. S. Soil landscapes of Canada: Yukon, 1 : 1 000 000 scale map and database // Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa, 1992.

*Поступила в редакцию
16 сентября 1997 г.*