

Биологический круговорот и почвообразование в экосистемах горных тундр Крайнего Северо-Востока Азии

А. А. ПУГАЧЕВ, П. Е. ТИХМЕНЕВ*

*Институт биологических проблем Севера ДВО РАН
685000 Магадан, ул. Портовая, 18*

**Северный международный университет,
685000 Магадан, ул. Портовая, 13*

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты комплексных исследований запасов и структуры над- и подземной биомассы, данные по химическому составу доминантных видов растений типичных горно-тундровых ландшафтов Северного Охотоморья, Верхнеколымского нагорья и Арктического побережья Чукотки. Выявлено, что горно-тундровые экосистемы Крайнего Северо-Востока Азии характеризуются значительным накоплением мертвых растительных остатков, что обусловлено несоответствием между поступлением опада и скоростью его разложения, низкими температурами, особенностями химизма среды и специфическим биохимическим составом растений.

Показано, что величины ежегодного потребления химических элементов приростом варьируют от 8,5 до 16,6 кг/га. В кустарничково-лишайниковых тундрах ряды поглощения химических элементов идентичны, несмотря на отличия в соотношении структурных компонентов растительной массы. Дается характеристика особенностей почвообразования в различных типах горных тундр, которые различаются между собой степенью выраженности Al-Fe-процесса.

Горный рельеф, сочетание океанических и континентальных черт климата определили своеобразие почв и растительного покрова Крайнего Северо-Востока Азии, являющегося одним из основных очагов формирования бореальных, гипоарктических и арктических элементов флоры. Для территории характерны развитие и широкое распространение горных тундр, в состав которых входит большое число общих с зональными тундрами видов растений. Совокупность всех формаций горных тундр занимает около 14 % поверхности региона [1], в том числе в пределах Чукотского автономного округа их площадь составляет 15 %, а в колымских и приохотских районах не превышает 3 % территории. В континентальной части региона рассматриваемые природные образования не

опускаются ниже 700–750 м над ур. м., а на побережье Северного Ледовитого океана развиваются на всех хорошо дренированных элементах рельефа.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования биологического круговорота и различных аспектов почвообразования проведены в горных тундрах Северного Охотоморья на отрогах Хасынского хребта, хребте Большой Анначаг Верхнеколымского нагорья и отрогах Раучуанского хребта на Чукотке. Интерес к данному виду работ вызван тем, что переход России к новым условиям хозяйствования длительное время не позволял изучать процессы обмена веществ в системе почва–растение, так как это очень трудоемкий

процесс, требующий значительных средств для проведения исследований в труднодоступных районах Крайнего Севера. После пика сбора данных по этой проблеме, который пришелся на 70–80-е гг. минувшего столетия – период активного освоения северных территорий страны и ее участия в реализации программы МАБ ЮНЕСКО “Человек и биосфера”, наступил длительный перерыв.

Привлечение внимания к Северо-Востоку Азии обусловлено тем, что в связи с переходом от разработки россыпных месторождений золота к рудным повысился интерес к экологии горных территорий. Этим обстоятельством и обусловлено стремление авторов к обобщению уже имеющихся и анализу новых данных по биокруговороту и почвообразованию в экосистемах горных тундр.

Объектом исследований на северном побережье Охотского моря стала горная бруснично-кассиопеево-лишайниковая тундра вблизи вершины сопки на высоте 475 м над ур. м. с крутизной склона 5°. Кустарничковый покров представлен здесь в основном вересковыми – *Vaccinium vitis-idaea* (L.) Avrorin, *V. uliginosum* L., *Ledum decumbens* (Aiton) Loddiges ex Steudal, *Cassiope ericoides* (Pallas) D. Don., *Phyllococe caerulea* (L.) Babington и *Loiseleuria procumbens* (L.) Desvaux. Встречаются отдельные куртины *Pinus pumila* (Pall.) Rgl. высотой 40–50 см. Характерен хорошо развитый лишайниковый покров, где доминируют *Cladonia alpestris* (L.) Rabh. и *Cl. rangiferina* (L.) Web., *Cetraria nivalis* (L.) Ach. и *C. cucullata* (Bell.) Ach. В почвенном покрове преобладают подзолы иллювиально-гумусовые. На отрогах хр. Б. Анначаг пробные площади заложены в двух типах горно-тундровой растительности. Горная диапензиево-кассиопеево-лишайниковая пятнистая тундра приурочена к выположенной вершине горного поднятия с абсолютной высотой 1200 м. Каменистая поверхность занимает до 12 % площади, на пятна голого грунта приходится около 26 %. Кустарничковый ярус разрежен, его высота 5–10 см. Среди кустарничков доминируют *Betula exilis* Sukacz. и *Salix phlebophylla* Andersson. Травяно-кустарничковый ярус представлен *Vaccinium uliginosum* L., *Rhododendron parvifolium* Adam, *Cassiope ericoides*, *Diapensia obovata* (Fr. Schmidt) Nakai, *Dryas punctata* Juz., различными осо-

ковыми и другими видами с меньшим обилием. В лишайниковом покрове преобладают *Alectoria ochroleuca* (Ehrh.) Nyl., *Cornicularia divergens* Ach., *Cetraria nivalis* и *C. cucullata*. Почвенный покров сформирован наноконкомплексом подбуров тундровых, почв пятен и мерзлотных трещин. Вторая – горная дриадово-кассиопеево-лишайниковая тундра, расположенная на той же высоте с уклоном 1–2° юго-восточной экспозиции. Камни занимают до 17 % поверхности. Травяно-кустарничковый ярус в основном представлен *Rhododendron parvifolium*, *Cassiope ericoides*, *Dryas punctata* и осоковыми. На лишайники приходится около 30 % площади изученного участка. Среди них доминируют *Alectoria ochroleuca*, *Cornicularia divergens*, *Cetraria nivalis*, *C. cucullata*, *C. chrysantha* Tuck. и *Thamnia vermicularis* (L.) Ach. В этих условиях развивается наноконкомплекс подбуров светлых и темных тундровых.

На арктическом побережье Чукотки изучали горную разнотравно-дриадово-моховую тундру, приуроченную к платообразной части г. Пиней в отрогах Раучуанского хребта. Абсолютная высота 260 м, уклон 3–5°. Пятна занимают 16 % общей площади, бровки пятен – 28 %, трещины – 21 % и основные поверхности – 35 %. В кустарничковом ярусе доминируют *Betula exilis*, *Dryas punctata*, *Cassiope ericoides*, *Salix arctica* Pall., *Ledum decumbens*, *Empetrum androgynum* V. Vassil., *Vaccinium vitis-idaea* и *V. uliginosum*. Особенность данного типа тундры – флористическое разнообразие травостоя с хорошо выраженным лишайниково-моховым покровом, в котором доминируют *Cetraria islandica* и *C. cucullata*, *Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwaegr., *Tomenthypnum nitens* (Hedw.) Loeskc. и ряд других видов. Почвенный покров сформирован криокомплексом подбуров тундровых и тундрово-степных почв.

Определение запасов и структуры биомассы горно-тундровых фитоценозов основывалось на методических указаниях, разработанных Л. Е. Родиным, Н. П. Ремезовым и Н. И. Базилевич [2]. За границу раздела фитомассы на над- и подземную приняли линию перехода “живых” частей мхов в бурые (отмершие). У лишайников к подземной фитомассе относили более темные (по сравнению с верхними) нижние части таломы.

Подземную растительную массу разбирали на корни (условно живые определяли на основании раскопки подземных систем модельных растений в трехкратной повторности, мертвые – по разнице между всей массой корней и массой живых), остатки коры, измельченное органическое вещество, представляющее собой как обломки мелких корней, так и полуразложившийся корневого опада. У вечнозеленых кустарничков прирост учитывали по массе листьев и побегов текущего года. У листопадных кустарничков и кустарничков нарастание зеленой части определяли по массе побегов текущего года и листьев, отмирающих в год исследований. Прирост однолетних частей кустарничков и кустарничков суммировали с приростом их многолетней части, которая, по Д. Н. Данилову [3], составляет 1/34–1/38 общего запаса. Прирост корней рассчитывался пропорционально приросту надземной фитомассы растений. Прирост мхов принимался равным 20 % от запаса их живых частей [4], а лишайников – 5,38 % [5]. Для учета ежегодного опада кустарничков под их доминантными видами в трехкратной повторности устанавливали опадодуловители размером 0,25 м². Опад мхов ориентировочно принимался соответствующим 70 % их ежегодного прироста [6]. При определении опада лишайников мы, исходя из данных, полученных ранее А. С. Салазкиным [7], приравнивали возраст лишайникового покрова к периоду обновления пододея. Как известно, в этот период уже не происходит увеличения массы лишайников, так как прирост равен отмиранию.

Скорость разложения опада растений определялась в течение трех лет посредством закладки 10 г свежего опада в специальные капроновые мешочки размером 10 × 10 см с ячейей 1 мм² (для свободного доступа почвенных беспозвоночных) в трехкратной повторности.

Расчет содержания химических элементов в составе общих запасов растительного органического вещества (кг/га) производили путем умножения массы структурных компонентов растительного покрова на содержание в них того или иного элемента. Расчет годичного потребления зольных элементов и азота выполняли путем перемножения массы структурных компонентов прироста и величин максимального содержания в них от-

дельных химических элементов [8]. На основании этого вычислялось общее годичное потребление минеральных веществ фитоценозами в целом. Аналогично поступали и при расчетах годичного возврата зольных элементов и азота с опадом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены характеристики запасов и структуры над- и подземной биомассы, химического состава растений, а также данные по элементам биологического круговорота и особенностям почвообразования в экосистемах горных тундр Крайнего Северо-Востока Азии.

Запасы и структура биомассы. Данные по запасам биомассы типичных горно-тундровых фитоценозов региона отражены в табл. 1. Порядок величин для дриадово-кассиопеево-лишайниковой и разнотравно-дриадово-моховой тундр составляет 31,3–37,0 т/га, наименьшие показатели свойственны бруснично-кассиопеево-лишайниковой тундре – 24,5 т/га.

Надземная фитомасса цветковых растений в кустарничко-лишайниковых типах тундровых экосистем составляет 2–3, в пятнистых тундрах – 4–5 % от общей биомассы; на долю мхов и лишайников приходится 10–30 и 4–9 % соответственно.

Различия в биоклиматических условиях районов исследований четко проявляются в степени участия надземной биомассы в составе общих запасов растительного органического вещества: 29–37 % для горных тундр Хасынского хребта, 18–20 % – для горных тундр хр. Б. Анначаг и отрогов Раучуанского хребта.

Установлено, что все горно-тундровые фитоценозы Крайнего Северо-Востока характеризуются значительным накоплением мертвых растительных остатков, что обусловлено несоответствием между темпами поступления опада и скоростью его разложения, что вызвано низкими температурами, особенностями химизма среды и специфическим биохимическим составом опада растений.

Соотношение запасов подземной биомассы к надземной в кустарничково-лишайни-

Биомасса горно-тундровых фитоценозов Крайнего Северо-Востока Азии, т/га сухого вещества

Компоненты биомассы	Горная тундра			
	бруснично-кассиопеево-лишайниковая	диапенсиево-кассиопеево-лишайниковая пятнистая	дриадово-кассиопеево-лишайниковая	разнотравно-дриадово-моховая пятнистая
Надземная биомасса	9,09	4,50	5,52	13,02
Фитомасса	7,77	3,26	4,08	9,10
В том числе:				
кедровый стланик – зеленые части	0,25	–	–	–
кустарнички – зеленые части	0,27	1,19	1,02	5,16
травянистые	–	0,03	0,06	0,21
мхи, лишайники	7,25	2,04	3,00	3,73
Отмершие части растений	1,32	1,24	1,44	3,92
В том числе:				
кедровый стланик – зеленые части	1,15	–	–	–
кустарнички – зеленые части	0,17	1,03	1,40	3,52
травянистые	–	0,21	0,04	0,40
Подземная биомасса	15,39	18,44	35,76	13,23
В том числе:				
очес мхов, лишайники	4,26	1,03	1,49	2,87
живые корни	2,89	7,96	21,55	5,12
отмершие корни				
детрит	8,24	9,45	12,72	5,24
Общая биомасса	24,48	22,94	41,28	26,25

П р и м е ч а н и е. Прочерк – отсутствует.

ковой пятнистой тундре составило 3,5 : 1,0, а в кустарничко-лишайниковой – 5,0 : 1,0. Оно существенно расширяется у сосудистых растений: 6,0 : 1,0 и 21,0 : 1,0 соответственно. Столь широкие различия свидетельствуют о неблагоприятных условиях произрастания высших растений, у которых вследствие этого для обеспечения себя элементами минерального питания развивается мощная корневая система, основная часть которой сосредоточена в верхних органогенных горизонтах А0А1 и АВh. На большей глубине количество корней резко снижается: в подбурах темных тундровых – в 13 – 35 раз, а в подбурах светлых – в 2 раза.

В составе подземной биомассы наряду с корнями содержится значительное количество измельченного корневого опада разной степени гумификации, что характерно для почв арктических и субарктических районов в целом [8, 10].

Таким образом, экосистемам горных тундр региона свойственны те же закономерности формирования растительного органического вещества, что и для большинства раститель-

ных сообществ Субарктики [9], а именно превышение запасов подземной биомассы над надземной, значительное варьирование запасов и компонентов растительного вещества по элементам микро- и нанорельефа.

Ежегодный прирост и опад растительной массы. По величине годичного прироста (0,39–1,33 т/га в год) экосистемы горных тундр относятся к очень малопродуктивным фитоценозам [8]. В зависимости от структуры фитомассы и экологических условий местообитания роль отдельных компонентов в создании массы прироста варьирует в широких пределах (табл. 2): фотосинтезирующих органов – от 56 до 81 %, многолетних частей – от 7 до 17, корней – от 12 до 30 %. Максимальные для горных тундр приросты образуют кедрово-стланиковые бруснично-кассиопеево-лишайниковые ассоциации. Они вполне сопоставимы с кустарничковыми пустошами Нью-Хэмпшира [11] и кустарничковыми тундрами Кольского полуострова [12]. Значительное участие *Pinus pumila* (Pall.) Rgl. в составе фитомассы обуславливает снижение в формировании прироста роли фотосинте-

Масса ежегодного прироста и опада в экосистемах горных тундр, т/га сухого вещества

Показатель	Горная тундра			
	бруснично-кассиопеево-лишайниковая	диапенсијево-кассиопеево-лишайниковая пятнистая	дриадово-кассиопеево-лишайниковая	разнотравно-дриадово-моховая пятнистая
Ежегодный прирост	0,58	0,39	0,47	0,70
В том числе:				
фотосинтезирующие органы	0,47	0,26	0,34	0,49
многолетние органы	0,04	0,03	0,04	0,05
корни	0,07	0,10	0,09	0,16
Ежегодный опад	0,52	0,35	0,44	0,61
В том числе:				
фотосинтезирующие органы	0,46	0,24	0,33	0,44
многолетние органы	0,01	0,02	0,03	0,03
корни	0,05	0,09	0,08	0,14

зирующих органов и увеличение вклада многолетних надземных частей. По продуктивности исследованные кустарничково-лишайниковые и разнотравно-дриадово-моховые тундры схожи с альпийскими тундрами умеренной зоны Западного полушария [11] и примерно вдвое уступают арктическим тундрам [10], чья более высокая продуктивность объясняется большей длительностью и интенсивностью круглосуточного освещения и повышенным участием в составе фитомассы разнотравья и злаков [8, 12].

Величина годового опада в горно-тундровых фитоценозах близка годовому приросту. По сравнению с приростом в его составе увеличивается доля фотосинтезирующих органов (до 88 % в бруснично-кассиопеево-лишайниковой тундре) и уменьшается – многолетних частей и корней.

Скорость деструкции опада в экосистемах горных тундр очень низка. Наименее активно разлагаются отмершие части лишайников. В частности, для полной минерализации годового опада лишайников и высвобождения из него химических элементов требуется не менее 26 лет. Отношение мортмассы к фитомассе закономерно увеличивается по мере усиления суровости климата: в горных тундрах Северного Охотоморья она варьирует от 2,0 до 3,4, на Верхнеколымском нагорье – от 4,2 до 5,2, в тундрах северной Чукотки достигает 7,7.

Химический состав растений. При общем низком содержании зольных элементов кус-

тарнички горных тундр (табл. 3) могут быть разделены на три основные группы: с суммой зольных веществ более 2 %, 1–2 и менее 1 %. Первую группу образуют *Diapensia obovata* и *Dryas punctata*; вторую – *Arctous alpina* и *Cassiope ericoides*; третью – *Rhododendron parvifolium* и *Loiseleuria procumbens*. В составе кустарничков первой группы в порядке убывания доминируют: азот, кремний, кальций, калий и алюминий; второй – азот, кальций, магний, калий и кремний; третьей – азот, кальций, калий, кремний и магний.

Лишайникам свойственно наиболее низкое содержание зольных элементов и азота. Их также можно условно разделить на три группы: с суммой зольных элементов более 1 % (*Peltigera rufescens* (Weis) Humb.), 0,5–1,0 % (*Cornicularia divergens* и *Cetraria cucullata*), менее 0,5 % (*Alectoria nigricans* (Ach.) Nyl.). В составе первой и второй групп доминируют азот, кремний, сера и калий, третьей – азот, кальций, калий, магний и кремний.

Различия в геохимической подвижности химических элементов, мобилизующихся при выветривании почвенных минералов, в условиях Al–Fe-гумусового почвообразования четко прослеживаются при анализе состава золы мелких корней, большая часть которых мертва и пропитывается теми или иными химическими элементами в процессе их перемещения в почвенном профиле. Рассмотрение представляемых данных свидетель-

Показатели биологического круговорота зольных элементов и азота в экосистемах горных тундр

Показатель	Запасы химических элементов, кг/га					
	Горная тундра					
	бруснично-кассиопеево-лишайниковая		дриадово-кассиопеево-лишайниковая		разнотравно-дриадово-моховая пятнистая	
	1	2	1	2	1	2
В общей биомассе	172,4	298,3	332,7	532,8	428,8	659,6
В фитомассе	67,6	94,4	64,5	96,9	67,1	95,8
В том числе:						
в фотосинтезирующих органах	62,9	86,8	35,8	56,6	34,0	50,7
в многолетних органах	2,5	4,0	13,2	21,1	15,4	23,2
во мхах, лишайниках, подземных органах	2,2	3,8	15,5	19,2	17,7	21,9
В мортмассе	104,8	203,7	268,2	435,9	361,7	563,8
В том числе:						
в фотосинтезирующих органах	3,9	5,9	13,7	21,9	23,3	37,7
в многолетних органах	5,7	9,0	9,4	15,3	6,3	10,2
во мхах, лишайниках	34,6	47,3	12,8	20,2	42,1	62,4
в подземных органах	19,4	31,0	163,4	202,4	218,5	270,7
в детрите	41,6	110,5	68,9	176,1	71,5	182,8
Потребление приростом, кг/(га · год)	5,9	8,5	7,3	11,2	11,3	16,6
В том числе:						
фотосинтезирующих органов	4,5	6,5	5,2	6,4	8,0	12,3
многолетних органов	0,9	1,2	0,7	1,1	0,8	1,2
мхов, лишайников, корней	0,5	0,8	1,4	1,7	2,5	3,1
Возврат в почву с опадом, кг/(га · год)	4,1	6,4	5,3	7,9	10,2	14,7
В том числе:						
фотосинтезирующих органов	3,8	5,8	3,7	5,8	7,6	11,4
многолетних органов	Сл.	0,1	0,4	0,6	0,4	0,6
мхов, лишайников, корней	0,3	0,5	1,2	1,5	2,2	2,7

П р и м е ч а н и е. 1 – зольные элементы; 2 – зольные элементы + азот; Сл. <0,5 кг/(га · год).

тоценоз растений, так и приспособительной реакцией растений к увеличению суровости климата при переходе от Тихоокеанского региона к бассейну Северного Ледовитого океана. Ежегодный возврат азота и зольных элементов с опадом варьирует от 6,4 до 14,7 кг/(га · год). В кустарничково-лишайниковых тундрах в его составе преобладают азот, кальций, сера и калий. Эти же элементы доминируют в опаде кедрово-стланиковых кустарничково-лишайниковых тундр. Однако соотношение их несколько иное: пер-

вое место занимает кальций, затем азот, калий, кремний и сера.

В опаде растений по сравнению с приростом уменьшается доля азота и калия при одновременном увеличении кальция, серы, алюминия.

Величина ежегодного возврата химических элементов с опадом в экосистемах горных тундр Северо-Востока в общих чертах близка таковой кустарничково-лишайниковых тундр Кольского полуострова [12]. Однако К. Н. Манаков, как, впрочем, и другие ис-

следователи, не приводит данных о количестве химических элементов, удерживаемых над- и подземным опадом прошлых лет. Между тем в кустарниково-лишайниковых тундрах их масса в 32–55, а в кедрово-стланиковых тундрах даже в 65 раз превышает величину ежегодного возврата химических элементов. Подавляющая часть его сосредоточена в подземных компонентах сообществ. В детрите происходит активное накопление азота и ряда химических элементов, интенсивно аккумулируемых растениями и имеющих относительно слабую геохимическую подвижность: кальция, калия, магния и кремния.

По типу биологического круговорота [8] экосистемы горных тундр могут быть охарактеризованы как очень и малопродуктивные, сильнозаторможенные, низкзольные, калиево-кальциево-азотные.

Почвы экосистем горных тундр. Почвы экосистем горных тундр Северного Охотоморья характеризуются сильной каменистостью, преобладанием в составе мелкозема грубодисперсных фракций. Содержание ила очень низкое, что связано с малой биохимической активностью почв и рядом сопутствующих явлений, к числу которых относятся агрегирование коллоидных и предколлоидных частиц в более крупные отдельно [13].

По физико-химическим показателям рассматриваемые почвы имеют однотипный характер профиля (табл. 5). Их органоаккумулятивные и подзолистые горизонты отличаются высокими значениями актуальной и потенциальной кислотностей, величины которых в горизонтах Bhf и BC в значительной степени снижаются, выполняя роль своеобразного геохимического барьера.

Распределение поглощенных оснований имеет четко выраженный аккумулятивный характер. При этом относительно низкое содержание кальция и магния объясняется низкой зольностью опадов и интенсивным выщелачиванием оснований в условиях гумидного климата и промывного водного режима почв [14].

Трансформация растительного опада развивается в направлении образования подвижного, кислого и агрессивного органического

вещества. В самих органоаккумулятивных горизонтах накапливаются преимущественно плохо разложившиеся растительные остатки, черные обугленные органические включения, коричневатобурое аморфное органическое вещество. Групповой состав гумуса характеризуется: 1 – доминированием фульвокислот, 2 – резким преобладанием подвижных и агрессивных фракций, 3 – очень низким содержанием гуминовых и фульвокислот, способных образовывать устойчивые малоподвижные комплексы с кальцием и магнием (фракция 2), 4 – заметной дифференциацией относительного содержания отдельных фракций по профилю. Вследствие широкого отношения между новообразованными гумусовыми веществами и R_2O_3 органоинеральные комплексы сохраняют высокую подвижность и вымываются из оподзоленных горизонтов вниз по профилю. Значительная часть их осаждается в гор. Bhf, чему способствует резкое сужение соотношения между органическим веществом и оксидами R_2O_3 [15], а также относительно резкое повышение значений pH, снижающих устойчивость органоинеральных соединений [16]. Именно этим и объясняется формирование иллювиально-алюможелезисто-гумусовых горизонтов. Распределение негидролизующего остатка коррелирует с распределением корней и их опада в почвенной толще. Высокое содержание бесцветного или светло-серого гумуса в органоаккумулятивных горизонтах свойственно не только почвам горных тундр рассматриваемой территории [13, 14], но и многим подзолистым почвам северной тайги и лесотундры Евразийского Севера [15].

Органогенные горизонты горно-тундровых почв Охотоморья характеризуются активным накоплением фосфора, кальция, магния и калия; менее выражено накопление железа. При сравнении минеральной части профиля с породами обращает на себя внимание заметное обеднение ее кремнеземом, что объясняется его высокой подвижностью и сильной ненасыщенностью им природных вод в холодных областях [16]. На фоне абсолютного обеднения почвенной толщи кремнеземом в ней относительно накапливаются алюминий, железо, титан, кальций и магний, что объясняется малой растворимостью в воде окси-

дов R_2O_3 и значительно более узким диапазоном значений pH, в которых они сохраняют устойчивость в растворах.

При анализе сущности процессов почвообразования нельзя недооценивать и роль крупнозема, составляющего от 25 до 75 % почвенной массы. Под действием химического и физического выветривания происходит химико-минералогическое изменение обломков породы. В подзолистых горизонтах они обедняются алюминием и железом, относительно обогащаясь кремнием, кальцием и калием. В иллювиальной части профиля щебень относительно обеднен по сравнению с породой кремнеземом и обогащен оксидами R_2O_3 , кальцием и калием.

Почвы горных тундр Верхней Колымы различаются по набору генетических горизонтов, степени выраженности морозной сортировки каменисто-мелкоземного субстрата, наличия или отсутствия погребенной органики. Морфолого-генетическое строение рассматриваемых почв может быть охарактеризовано на примере тундровых подбуров (см. табл. 5). Им свойственны сильная каменистость, преобладание в мелкоземе песка и крупной пыли. Тонкодисперсные частицы имеют явно подчиненное положение.

Отмеченные особенности механического состава обусловлены резким преобладанием физического дробления горных пород над химическим выветриванием минералов, что свойственно холодным гумидным регионам вообще [14, 17, 18]. Распределение ила, тонкой и отчасти средней пыли в почвенном профиле свидетельствует о накоплении их в верхних, наиболее прогреваемых и гумусированных горизонтах и резком снижении содержания данных фракций с глубиной. Подобный характер распределения вызван процессами оглинивания, свойственными подбурообразованию [14].

Наряду с процессами оглинивания в рассматриваемых почвах имеет место суспензионный вынос тонкодисперсных частиц, что подтверждают наилки на поверхности щебня и глыб коренных пород в средней части профиля.

Рассматриваемые почвы различаются между собой по ряду физико-химических показателей. Так, подбуры темные характеризуются

сильнокислой реакцией и большой гидролитической кислотностью органогенных горизонтов; с глубиной значения pH заметно повышаются, а величина гидролитической кислотности резко снижается, что коррелирует со степенью гумусированности.

Распределение обменных оснований и подвижных форм К и Р в профиле этих почв неоднородно: они активно накапливаются в живом растительном покрове и подстилках, в перегнойных горизонтах содержание их резко снижается, что вызвано вовлечением биофильных элементов в новый цикл биологического круговорота. В минеральных горизонтах содержание этих элементов очень мало, что связано с низкой поглотительной способностью мелкозема. Подбуры светлые отличаются от описанных выше почв менее кислой реакцией и слабой дифференциацией значений pH в почвенном профиле.

Исследованные почвы существенно различаются между собой по характеру органогенных горизонтов, содержанию и распределению в почвенном профиле гумуса. Эти особенности обусловлены характером поступления растительного опада, активностью его разложения, гумификации и минерализации, а также степенью проявления процессов криогенного массообмена. В подбурах светлых и темных основную массу опада образуют органы кустарничков, разлагающиеся и гумифицирующиеся с разной активностью. В частности, в подбурах темных гумусообразование останавливается на стадии грубого гумуса ("модер гумус"), состоящего из значительно, но не полностью гумифицированного растительного опада.

Общей для почв горных тундр Верхней Колымы является глубокая гумусированность минеральной толщи, что, по мнению В. О. Таргульяна [14], связано с иллювиированием новообразованных гумусовых веществ из подстилок и выпадением их в виде органо-минеральных комплексов в прилежащих горизонтах. Изучение группового и фракционного состава гумуса подбуров показало их большое своеобразие: в горизонтах АВh и А0А1 он имеет гуматно-фульватный характер, глубже – ярко выраженный фульватный. В составе гуминовых кислот явно преобладает

Аналитическая характеристика почв экосистем горных тундр

Почва	Горизонт	Глубина, см	рНводн.	Гумус по Тюрину, %	Гидролитичес- кая кислот- ность	Обменные основания		Степень насы- щенности осно- ваниями, %	Подвижные формы		Содержание частиц, мм	
						Ca	Mg		K ₂ O	P ₂ O ₅	<0,01	<0,001
						мг-экв/100 г почвы			мг/100 г почвы		% к мелкозему	
<i>Разнотравно-кустарниково-лишайниковая тундра</i>												
Подбур тундровый светлый	A0	0-1	4,3	34,8*	—	11,8	5,0	—	—	—	—	—
	A0A1	1-2	4,1	24,4	12,9	5,2	1,0	32	26	3	—	—
	ABh	2-10	4,3	3,0	3,0	1,5	0,5	40	5	12	18	9
	Bh	10-20	4,3	2,5	1,7	1,0	0,2	41	4	16	15	6
	Bh	25-35	4,5	1,2	0,9	1,0	0,1	55	—	—	13	5
	BC	40-50	4,6	0,5	0,3	0,4	0,1	62	—	—	10	4
<i>Кустарничково-алекториевая тундра</i>												
Подбур тундровый темный	A0	0-3	3,6	75,9*	—	17,1	4,4	—	19	9	—	—
	A0A1	3-15	3,7	17,0	12,4	7,7	3,6	48	5	3	20	10
	ABh	15-26	4,1	7,8	6,5	3,3	2,3	46	5	1	18	9
	Bh	30-40	4,2	2,3	4,1	3,0	Сл.	42	3	1	16	7
	BC	50-60	4,4	1,4	1,4	2,0	»	59	3	1	11	5
<i>Кустарничково-кладониевая тундра</i>												
Подзол иллювиально- гумусовый	A0	0-2	4,1	92,66	79,4	7,4	4,4	13	13	—	—	—
	A0A1	2-4	4,0	95,04	128,3	10,1	3,5	10	11	—	—	—
	A2Bh	4-7	4,6	3,68	10,1	1,1	0,8	16	1	—	10	2
	Bhalf	7-22	5,4	4,13	8,3	0,8	0,6	14	Сл.	—	17	5
	BC	23-39	5,8	0,81	4,7	0,7	0,8	24	»	—	12	4

П р и м е ч а н и е. Прочерк — не определялось; * — потеря при прокаливании; сл. — следы.

бурая фракция I, связанная с R_2O_3 . Максимум ее приурочен к органоаккумулятивным горизонтам, глубже содержание заметно снижается, но тем не менее остается значительным. Последнее представляется важным, так как в настоящее время доказано, что эта фракция характеризуется низкой растворимостью и, следовательно, подвижностью [19]. Отмеченное распределение фракции I гуминовых кислот может быть обусловлено следующим: 1 – глубоким проникновением корней растений и образованием ее *in situ* при гумусообразовании, хотя их основная масса в этих почвах приурочена к верхним органоаккумулятивным горизонтам и, следовательно, не является причиной данного явления; 2 – большой скважностью почвенной толщи, способствующей суспензионному выносу не только минеральных частиц, но и органического вещества перегнойного характера, а также крупных молекул гуминовых кислот. Этот путь, очевидно, играет существенную роль в глубокой гумусированности подбуров, в которых миграции суспензий способствуют: 1 – водный режим промывного типа; 2 – низкая поглощательная способность обломочных фракций мелкозема; 3 – активное развитие процессов криогенного массообмена в почвенной толще. Этот путь является, видимо, основным в формировании гумусового профиля рассматриваемых почв и относительно однородном распределении фракции I гуминовых кислот.

В условиях горной тундры преобладание низких температур и краткость летнего периода обуславливают низкую энергетику почвообразования, следствием чего являются малые количества мобилизованных при выветривании первичных минералов химических элементов.

Кремнезем практически не аккумулируется в почвенных профилях. Он мигрирует в форме истинных и коллоидных растворов кремневой и ортокремневой кислот, а также в виде органокремнистых соединений [20], обуславливая десиликацию почвенной толщи. Кальций, магний, калий и натрий также характеризуются значительной геохимической подвижностью, вследствие чего их мобилизованные формы легко мигрируют вниз по профилю. Однако в целом холодный лет-

ний период в горных тундрах и вхождение указанных элементов в устойчивые к выветриванию K–Na-полевые шпаты существенно лимитируют этот процесс, что объясняет сравнительное богатство мелкозема подбуров оксидами калия и натрия. Фосфор, марганец, сера, а также кальций, магний и калий активно вовлекаются в биологический круговорот, что сильно снижает их роль в процессах внутрипрофильной миграции.

Геохимическая подвижность алюминия и железа очень мала. Образующиеся при разложении подстилок и почвенного детрита агрессивные гумусовые кислоты взаимодействуют с первичными минералами, вызывая их разрушение, способствуя оглиниванию и ферриаллитизации почвенной толщи. На этом фоне развиваются процессы иллювиально-гумусового оподзоливания и суспензионного выноса тонкодисперсных частиц, обусловленные активной нисходящей миграцией почвенных растворов. Однако в условиях низких температур и краткого пребывания почв в талом состоянии активность этих процессов невелика, следствием чего является ограниченная элювиально-иллювиальная дифференциация профиля подбуров.

Общие черты почвенно-биологических процессов. Горно-тундровые ландшафты характеризуются интенсивным физическим разрушением и замедленным химическим выветриванием почвообразующих пород, приводящих к накоплению в почвах больших количеств обломочных фракций.

Различия в геохимической подвижности химических элементов, мобилизующихся при выветривании почвенных минералов, в условиях Al–Fe-гумусового почвообразования проявляются при анализе состава зольных элементов в мелких корнях, большая часть которых мертва и пропитывается теми или иными веществами в зависимости от их перемещения в почвенном профиле. Рассмотрение полученных данных свидетельствует о том, что калий, кальций, магний, марганец и сера интенсивно вовлекаются в биологический круговорот, вследствие чего их роль в процессах внутрипрофильной миграции невелика. Геохимическая подвижность Al и Fe очень мала, с чем связаны относительное

накопление их в мертвых растительных остатках и способность осаждаться в верхних минеральных горизонтах (при подбурообразовании). В условиях широкого соотношения новообразованных гумусовых кислот и R_2O_3 часть органоминеральных соединений выносятся с нисходящими почвенными растворами, способствуя формированию подзолистого горизонта. Глубже часть их усредняется и выпадает в осадок, что приводит к образованию иллювиально- $Al-Fe$ -гумусовых горизонтов.

В этих условиях функционирует сильно заторможенный, малоемкий биологический круговорот, результатом которого является ограниченное количество ежегодно образующегося органического вещества, способного к взаимодействию с минеральной частью почв. Поверхностное поступление и накопление отмершей растительной массы, связанные с преобладанием фотосинтезирующих органов и расположением корневых систем в верхней части профиля, в сочетании с замедленной деструкцией растительного опада и активным вовлечением элементов-органогенов в новые циклы биологического круговорота веществ приводят к образованию кислого, агрессивного и высокоподвижного вещества, способного к миграции в профиле и за его пределы.

Необходимым условием для проявления иллювиально-гумусового оподзоливания является широкое отношение между количествами реагирующего кислого органического вещества и мобилизуемых в подвижное состояние железом и алюминием. Малое ежегодное продуцирование агрессивного гумуса и высокое содержание оксидов R_2O_3 , несмотря на присутствие в почвах устойчивых светлых минералов, обуславливают в горно-тундровых ландшафтах континентальных районов образование подбуров – почв с морфологически неоподзоленным профилем. Относительно более высокое соотношение гумуса и мобилизованных оксидов в сочетании с увеличением температурного уровня летнего периода приводят к формированию в горных тундрах Северного Охотоморья подзолистых почв.

В подбурах взаимодействие гумусовых веществ с минеральной массой и мобилиза-

ция алюминия и железа происходят принципиально так же, как и в элювиальных горизонтах подзолов. Однако в отличие от последних в подбурах отбеленный минеральный материал скапливается лишь в органоаккумулятивных горизонтах и маскируется цветом преобладающей массы темноокрашенного вещества. Осаждение вымываемых органоминеральных и других соединений алюминия и железа начинается сразу же под органоаккумулятивными горизонтами, где соотношение подвижных гумусовых веществ и ферриаллитизированной минеральной массы резко сужается.

Следовательно, формирование подбуров и подзолов в горно-тундровых ландшафтах Крайнего Северо-Востока Азии является закономерным результатом взаимодействия биоклиматических факторов почвообразования с геологическими и геоморфологическими условиями [21]. Общими особенностями $Al-Fe$ -гумусовых почв являются относительно слабая выраженность процессов криогенного влаго- и массообмена в их профиле и ограниченное значение этих процессов для формирования генетических горизонтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Т. Реутт, Север Дальнего Востока, М., 1970, 257–299.
2. Л. Е. Родин, Н. П. Ремезов, Н. И. Базилевич, Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах, Л., 1968.
3. Д. Н. Данилов, *Ботан. журн.*, 1958, **43**: 3, 388–393.
4. Н. И. Пьявченко, *Почвоведение*, 1960, 6, 21–32.
5. В. И. Левина, *Ботан. журн.*, 1960, **45**: 3, 418–423.
6. Н. И. Пьявченко, Повышение продуктивности заболоченных лесов, Л., 1963, 42–46.
7. А. С. Салазкин, *Советский оленевод*, 1937, 11, 43–54.
8. Л. Е. Родин, Н. И. Базилевич, Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара, М.:Л., 1965.
9. Н. И. Базилевич, Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии, М., 1993, 293.
10. В. Д. Александрова, О подземной структуре биомассы некоторых растительных сообществ арктической тундры на острове Б. Ляховском, Л., 1962, 6, 148–160.
11. L. S. Bliss, *Ecology monography*, 1956, 26, 303–337.

12. К. Н. Манаков, Продуктивность и биологический круговорот в тундровых биогеоценозах, Л., 1972.
13. Е. М. Наумов, Б. Н. Градусов, Мерзлотные почвы и их режим, М., 1964, 28–99.
14. В. О. Таргульян, Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях, М., 1971.
15. В. В. Пономарева, Теория подзолообразовательного процесса. Биохимические аспекты, М.; Л., 1964.
16. К. Б. Краускопф, Геохимия литогенеза, М., Изд-во иностр. лит., 1963, 210–233.
17. P. Hill, C. C. F. Tedrow, *Amer. J. Sci.*, 1966, **259**: 2, 84–101.
18. C. C. F. Tedrow, *Soils of the Polar Landscapes*, New Jersey, USA, Rutgers Univ. Press, 1977.
19. В. В. Пономарева, Т. А. Плотникова, Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения), Л., 1980.
20. Н. И. Белоусова, Альфегумусовое почвообразование (на примере Алданского нагорья): Автореф. дис. ... канд. биол. наук, М., Ин-т почвоведения им. В. В. Докучаева, 1974.
21. А. А. Пугачев, Экологические основы рационального использования почв Крайнего Северо-Востока России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук, Владивосток, 1996.

Biological Circulation and Soil Formation in Ecosystems of Mountain Tundras of the Extreme North-East of Asia

A. A. PUGACHEV, P. E. TIKHMENEV

Results of comprehensive of reserves and structure of above-ground and subterranean biomass, data on the chemical composition of dominant plant species of typical mountain-tundra landscapes of the northern Okhotsk Sea shores, Upper Kolyma upland and the Arctic coasts of Chukotka are presented. It is found that mountain tundra ecosystems of the extreme north-east of Asia are characterized by a considerable accumulation of dead plant residues, which is determined by a discrepancy between the supply of leaf-fall and the rate of its decomposition, low temperatures, peculiarities of the environment conditions and a specific biochemical composition of plants. It is demonstrated that the annual consumption of chemical elements varies from 8,5 to 16,6 kg/ha. In small-shrub-lichen tundras, the series of absorption of chemical elements are practically identical, despite the differences in the ratios of structural components of vegetable mass. Characteristics of pedogenesis peculiarities in various types of mountain tundras that differ in the expression of Al-Fe process are presented.