

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4(571.54)

ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ ТУРБИРОВАНИЕ ПОЧВ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПОВЫШЕНИЙ¹

© 2020 г. Н. Б. Хитров^а, *, В. Л. Убугунов^б, В. И. Убугунова^б, Ю. А. Рупышев^б, Т. А. Аюшина^б,
А. Д. Жамбалова^б, Э. Г. Цыремпилов^б, А. Е. Парамонова^б, Ц. Н. Насатуева^б

^а Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

^б Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670037 Россия

*e-mail: khitrovnb@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2019 г.

После доработки 04.08.2019 г.

Принята к публикации 20.09.2019 г.

В северной части Баргузинской котловины в районе разгрузки Кучигерских гидротерм по периферии болот и на вогнутых заболоченных поверхностях аллювиальной равнины обнаружены валы и кочкообразные микроповышения неясного генезиса. Классический механизм образования кочек травяных болот здесь заменяется диапировым, возникающим вследствие давления восходящих газогидротермальных флюидов из сейсмически активных глубинных разломов. Представлено строение и некоторые свойства почв переходных участков от болотного массива с активными грифонами термальных вод Кучигерского источника к аллювиальной равнине, имеющих сильновыраженный микрорельеф в виде цепочек микроповышений на фоне сети микродолин. Получены эмпирические статистические кумулятивные распределения морфометрических характеристик микрорельефа. Исследованные микроповышения образуют генетический ряд газогидротермально турбированных почв от органогенных вариантов с минимальным внедрением снизу песчаного материала на краю болота до преимущественно минеральных вариантов выдавленного кверху глеевого горизонта разной степени окисления на аллювиальной равнине.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая зона, газогидротермальные флюиды, морфология почв, микрорельеф, засоленность почв, пирит

DOI: 10.31857/S0032180X20020069

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время обращают внимание на развитие почв в экстремальных условиях среды [9], в частности на территориях с сильным влиянием эндогенных процессов. В таких почвах часто имеются признаки, которые не учитываются в существующих классификациях почв [6], что создает затруднения в идентификации почв и выяснении их генезиса.

Территории с выходами на поверхность гидротермальных источников встречаются на всех континентах [3]. Они приурочены к тектонически активным зонам с разломами земной коры и вулканами [3, 42, 52, 55]. На таких объектах исследуют тепловые поля [37, 47, 50, 54], состав и режим выделяющихся газов [13, 53] и изливающихся вод [25, 37, 53], гидротермальное преобразование минерального состава пород и почв [8, 14, 44, 45, 56, 57], изменение растительности и сообществ микроорганизмов [24, 29, 46]. Образование ряда древ-

них кор выветривания связывают с гидротермальными процессами [28].

Для некоторых наиболее известных объектов опубликованы сведения об особенностях строения почв термальных полей и прилегающих к ним территорий с менее выраженным влиянием гидротермального воздействия [5, 7, 8, 11, 17, 30, 48, 52, 55, 58, 59]. Отмечается, что горизонты в почвах, преобразованные гидротермальными процессами, отличаются более тяжелым гранулометрическим составом вплоть до глины за счет новообразования глинистых минералов в условиях повышенной температуры и особого состава поднимающихся подземных вод. Эти горизонты имеют разнообразную окраску от красной до сизой в зависимости от окислительно-восстановительных условий в горизонте. Имеются предложения по выделению особых гидротермально-метаморфических горизонтов Bm, Cm [7, 8, 33].

При характеристике рельефа термальных полей обращают внимание на образование вогнутых форм (котловин, грязевых котлов и др.) за

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные по doi 10.1134/S0032180X20020069

счет увеличения количества пор и пустот при растворении минералов [33, 60]. В районах вулканов формируются эрозионные формы [59]. Изображения распределения почв вдоль катен имеют гладкие формы [30]. Сильновыраженный микрорельеф поверхности не отмечали.

Необычная озерно-болотно-аллювиальная равнина с разнообразным микрорельефом и выраженными признаками засоления существует в северо-восточной части крыла Байкальской рифтовой зоны [27]. Для региона характерно островное распространение многолетнемерзлых пород [12]. Формирование почв происходит в условиях влияния эндогенной тепловой аномалии Кучигерских гидротерм в Баргузинской котловине [10, 36, 38]. Сложное сочетание условий развития территории предопределило актуальность исследований по выяснению генезиса сильновыраженного микрорельефа с разными морфометрическими параметрами.

Цель работы – представить строение почв переходных участков от болотного массива с активными грифонами термальных вод Кучигерского источника к аллювиальной равнине, имеющих сильновыраженный микрорельеф в виде цепочек микроповышений на фоне сети микродолин.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили возле д. Кучигер Курумканского района Республики Бурятия на северо-востоке Баргузинской котловины в Улюнханской впадине. На этой территории отмечается сеть дизъюнктивных нарушений [18, 34] и максимальные параметры теплового потока в Байкальской рифтовой зоне [4, 18–20]. Выклинивание Кучигерских гидротермальных вод связано с пересечением генерального Баргузинского и поперечного Дыренского разломов [4, 39]. Вода термы имеет сильнощелочную реакцию (рН 9.28–9.90) и минерализацию 365–508 мг/дм³. Химический состав вод – хлоридно-сульфатно-фторидно-гидрокарбонатный натриевый [40]. По газовому составу воды источника отнесены к Байкальской гидротермальной области азотных терм, содержание азота достигает 63.3–95.5% [13, 25]. Разгрузка терм происходит в рыхлые, илистые отложения на площади примерно 200 × 500 м [40]. С западной стороны болотный массив ограничен шлейфом делювиальных отложений, сравнительно круто поднимающимся в сторону Баргузинского хребта, с восточной стороны – полого поднимающейся аллювиальной равниной, прорезанной узкой долиной р. Индихэн.

Изучены ключевые участки почвенно-геоморфологической трансекты РФ-2 с сильновыраженным микрорельефом в виде цепочек микроповышений среди сети микродолин. Они расположены в переходной полосе от болота к аллювиальной

равнине (рис. 1). Объектами изучения были почвы и растительность болотных и заболоченных экосистем (разрезы РФ-2-11, РФ-2-12, РФ-2-16 и РФ-2-18), дневная поверхность которых представлена микроповышениями неясного генезиса.

На каждом участке выполняли морфометрические измерения параметров микрорельефа: длины, ширины, высоты микроповышений, ширины микродолин и др. Объем выборки составлял от 22 до 57. На основе этих данных получены эмпирические статистические кумулятивные распределения.

Ботанические наблюдения проводили методом конкретных (локальных) флор [35] в пределах урочища с использованием проб флоры окрестностей (географического) пункта [41, 43]. Материалы обрабатывали согласно общепринятым методикам [22]. Отнесение растений к экологическим группам по факторам влажности и засоленности давали в соответствии с работами [15, 23]. Анализ биоморф растений проводили в соответствии с основными положениями биоморфологической классификации [31, 32]. Принадлежность к эколого-ценотическим комплексам, поясню-зональным группам определяли согласно [21].

Почвенные разрезы закладывали поперек цепочек микроповышений, захватывая соседние микродолины. Таким образом получали двумерное вертикальное сечение почв по микрокатене. Морфологическое описание почвенных профилей выполняли с использованием известных руководств [16, 49]. Почвы идентифицировали по диагностическим критериям, используемым в [26, 51], дополненных собственными предложениями по диагностике признаков импрегнирования почв органическим веществом [38].

Для всех объектов исследования фиксировали географические координаты с помощью приемника GPS.

В почвенных образцах определяли рН (почва : вода 1 : 2.5) потенциометрически, потерю органического вещества при прокаливании при 900°C, содержание органического углерода $C_{орг}$ методом мокрого сжигания по Тюрину [1, 2], активности ионов Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , F^- , в почвенных пастах с влажностью 30 мас. % с помощью ионоселективных электродов, гранулометрический состав методом Качинского.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строение кочек на болоте

Болотный массив представлен торфяно-перегнойными глеевыми почвами с общей мощностью органогенных горизонтов Т + Н от 40 до 70 см. Поверхность болота представлена нестрогой регулярной сетью чередующихся выпуклых торфяных кочек и вогнутых ячеек мочажин, заполненных

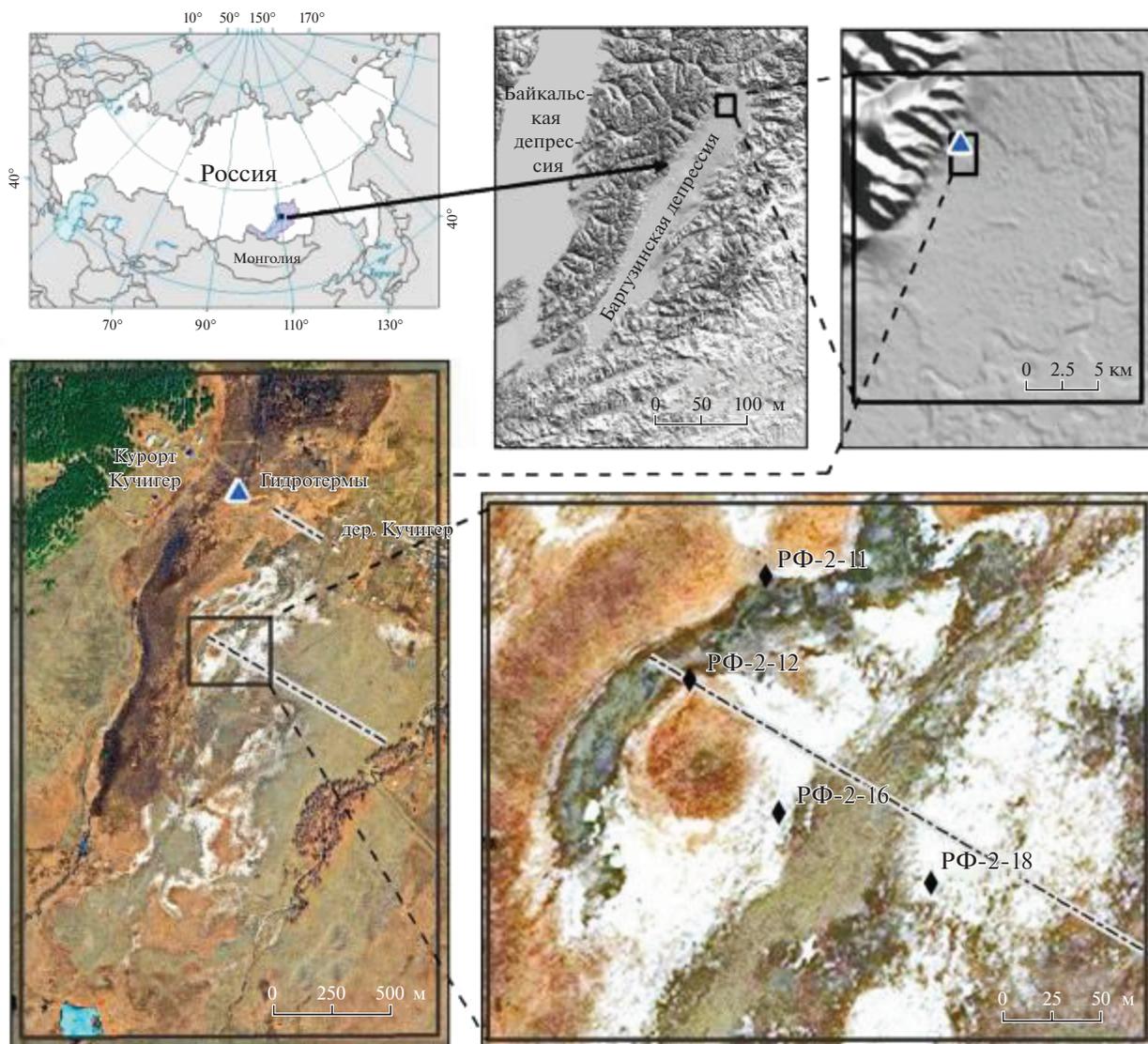


Рис. 1. Географическое положение объектов исследования.

водой глубиной до 2–10 см в зависимости от обилия дождей (рис. 2А). Кочки имеют высоту от 6–10 до 12–18 см и горизонтальный размер 30–40 см, мочажины – приблизительно такие же горизонтальные размеры от 25 до 40–45 см. В местах выходов газогидротермальных грифонов разной интенсивности образуются обширные мочажины, имеющие в диаметре от 1–2 до 5–10 м, похожие на небольшое озеро в болоте. Слой воды в таких озерах 5–15 см, под которым расположены бактериальные маты разного цвета: черные, серые, зеленые, оранжевые. На поверхности мата под водой отчетливо видны небольшие воронки диаметром 5–10 см и глубиной 5–7 см, из которых снизу периодически выделяются пузырьки газа (рис. 2Б).

Болотные кочки сложены эвтрофным торфом (горизонт ТЕ), пронизанным живыми корневи-

щами тростника (*Phragmites australis*) и/или осоки (*Carex reptabunda*) и лапчатки гусиной (*Potentilla anserina*), а также других более редко встречающихся видов растений (рис. 2В, 2Г). Кочки имеют следующие особенности, которые позволяют легко их диагностировать в полевых условиях, не делая разрез лопатой. Они полностью представлены органогенным материалом с высокой влажностью и опираются основанием на водонасыщенный органогенный горизонт Н, представленный тонкослойной толщей средне- и сильноразложившихся растительных остатков. После вскрытия нескольких кочек для получения морфометрических показателей строения ареал распространения таких органогенных кочек можно опробовать более щадящим способом. Органогенная обводненная кочка, покоящаяся

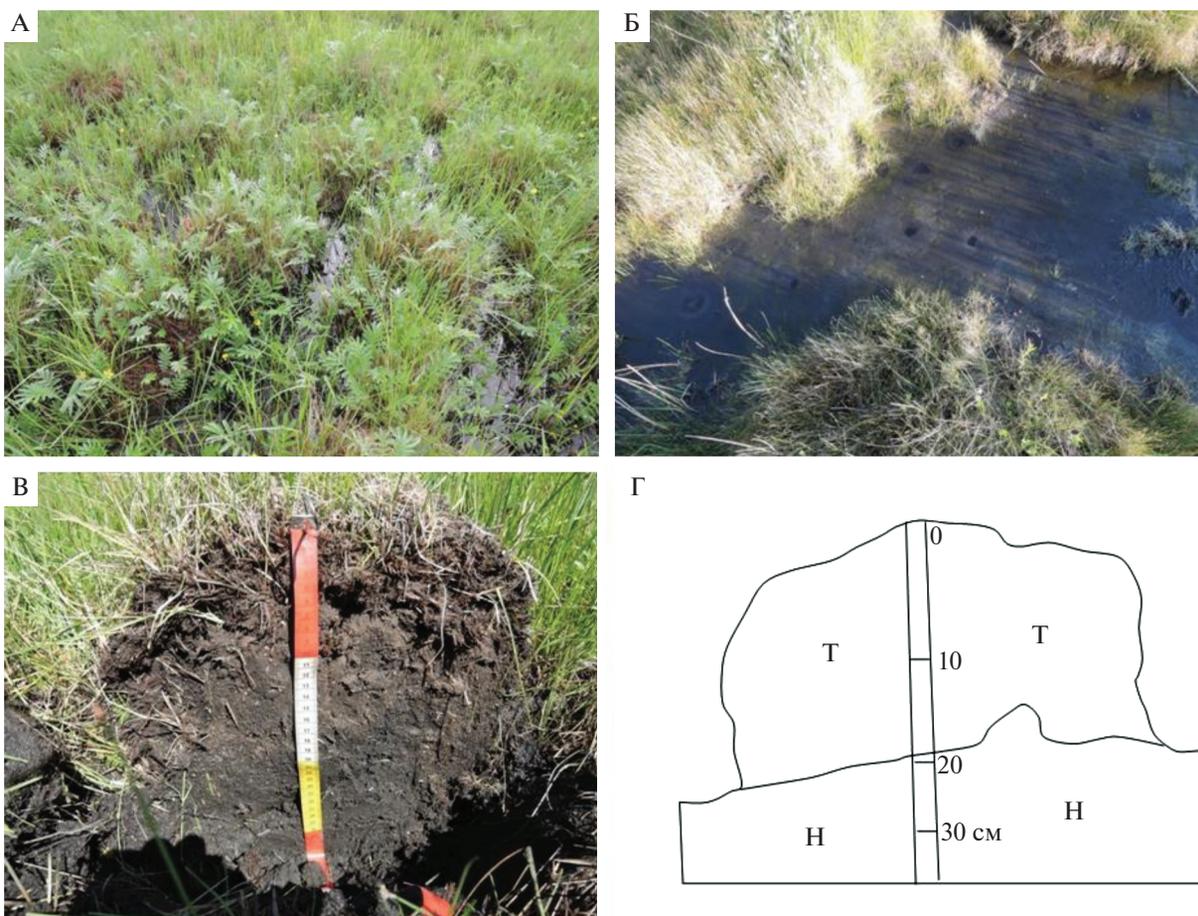


Рис. 2. Болотные растительные кочки: А – поверхность болота с кочками; Б – крупная мочажина с подводными воронками выхода подземных газов через бактериальный мат; В – вертикальное сечение кочки (фото); Г – схема строения кочки.

на органическом водонасыщенном горизонте, проявляет ярко выраженные упругие свойства. При надавливании на кочку сверху ногой, она легко сжимается, а после снятия нагрузки обратно распрямляется, как пружина.

Удельная электропроводность болотной воды варьирует в диапазоне от 0.3 до 0.9 дСм/м. Температура воды постоянная 18–22°C в ближайшем окружении от действующих мелких грифонов и заметно изменяющаяся в зависимости от суточного хода температуры воздуха на расстояниях более 20–30 м от грифонов. Состав воды близок к составу разгружающихся подземных термальных вод. Среди катионов абсолютно доминирует натрий (более 90–95%). Активность ионов кальция очень низкая (менее 0.1 ммоль/л) и контролируется растворимостью флюорита за счет заметного содержания в воде фторидов. Среди анионов преобладают гидрокарбонат- и сульфат-ионы [25, 38]. По мере удаления от действующих грифонов в краевых частях болота удельная электропроводность воды и содержание в ней ионов натрия и сульфатов постепенно возрастает по сравнению с

составом термальных вод. Вместе с тем по формальным критериям, торфяной и перегнойный горизонты, как в кочках, так и в мочажинах, являются незасоленными [36].

Микровышения переходной полосы (пояса) от болота с растительными кочками к сильновыдавленному дугообразному мезоповышению (валу-диапиру)

В болотном массиве, в который разгружаются подземные газогидротермальные флюиды возле Кучигера, помимо собственно заболоченной части встречается множество приподнятых участков, сложенных выдавленным снизу органическим и минеральным материалом в разных соотношениях. Строение одной из траншей через такое повышение в виде острова на болоте, подробно рассмотрено ранее [38]. Такие структуры называют валами-диапирами [34].

Вокруг каждого крупного вала-диапира, имеющего ширину несколько метров и длину до нескольких десятков метров, наблюдается пояс из

нескольких цепочек микроповышений с очень крутыми боковыми стенками и слегка закругленной верхушкой (рис. S1, 3А). В сухую погоду поверхность таких микроповышений и многие растения, произрастающие на ней, покрыты выцветами легкорастворимых натриевых солей (рис. 3А, 3Б). Цепочки микроповышений в несколько рядов буквально опоясывают вал-диапир целиком или его части, которые имеют непосредственный контакт с болотом. На космическом снимке такие цепочки микроповышений с выцветами солей на поверхности образуют белую узкую кайму вдоль границ болота и валов-диапиров (рис. 1).

Растительность представлена дернистоосоковым (*Carex cespitosa*) болотистым лугом, включающим 12 видов растений. Доминирующий вид — *Carex cespitosa*. Проективное покрытие — 63%, высота травостоя от 10 до 60 см. Структура двухъярусная, обычные виды этих лугов: *Agrostis mongolica*, *Poa pratensis*, *Carex coriophora*, *Carex bicolor*, *Eriophorum polystachyon*, *Equisetum arvense*, *Equisetum palustre*, *Rhinanthus aestivalis*, *Triglochin palustre*, *Trifolium repens*, *Vicia cracca*. В эколого-ценотической структуре присутствуют водно-болотные растения при доминировании луговых видов. Отличительной особенностью биоморфологического спектра является равное участие длинно- и короткокорневищных стержнекорневых групп растений. По отношению к фактору влажности доминируют гигрофиты.

Рассмотрим особенности микроповышений, возникших в переходной полосе между одним валом-диапиром и двумя болотными массивами разного размера, примыкающими к нему с разных сторон. Этот вал расположен на юго-западной окраине основного болотного массива приблизительно в 500–700 м к западу от наиболее активных грифонов гидротермальных источников и дер. Кучигер ниже по течению безымянного ручья. Вал-диапир имеет форму слабоизогнутой дуги длиной около 250 м, расширенной до 20–30 м в центральной части и сужающейся до 5–7 м в концевых участках (рис. S1). Относительное превышение вала в центральной части составляет 1.6–1.7 м по сравнению с уровнем воды в болоте с обеих сторон. Его поверхность плавно понижается вдоль дуги и сравнительно круто в поперечном направлении. По верхней части дуги диапира отчетливо выделяется гряда бугорков, смещенная ближе к основному болотному массиву, который находится в зоне активной разгрузки термальных вод. Выпуклая в плане сторона дуги вала-диапира граничит с основным болотным массивом, а вогнутая внутренняя сторона дуги — с отшнурованным замкнутым участком болота округлой формы. Несколько рядов цепочек сильновыступающих микроповышений с выцветами солей вытянуты вдоль обеих сторон вала-диапира, граничащих с внешним и внутренним болотом.

В табл. 1 представлены статистические показатели морфометрических параметров микроповышений и микродолин между ними на внешней и внутренней краевых дугах вала-диапира. Высота микроповышений (кочек) вдоль обеих краевых дуг варьирует от 19–22 до 45–50 см с медианами 32 и 36 см. Диапазон изменения ширины кочек приблизительно такой же: от 16–26 до 60–73 см с медианами 27 см на внешней и 37 см на внутренней дугах. Длина отдельной кочки варьирует значительно больше: от 18–35 до 103–120 см с медианами 51 и 64 см.

Микроповышения вытянуты вдоль линии границы вала-диапира с болотом. По своей форме чаще всего они похожи на тумбовидные надолбы с очень крутыми боковыми стенками и слегка закругленной выпуклой верхней стороной, хотя встречаются варианты конической формы с выпуклыми наружу сторонами конуса и сглаженной вершиной. Медиана отношения ширины к высоте микроповышения близка к единице, составляя 0.91 для внешней и 1.06 для внутренней дуг. Минимальные значения указанного отношения 0.5 и 0.67 означают, что встречаются микроповышения, похожие на низкие столбики, высота которых в 1.5–2 раза больше ширины. Некоторые микроповышения, наоборот, являются уплощенными. У них высота в 1.5–2 раза меньше ширины. В горизонтальном сечении форма микроповышения изменяется от округлой с почти равными шириной и длиной, до овальной с медианой отношения длинной оси к короткой около 1.5 и его максимумом чуть больше 3.

Как отмечалось выше, длинной стороной микроповышения ориентированы вдоль границы вала-диапира и болота, образуя несколько рядов цепочек. Между цепочками микроповышений образовались микродолины, похожие на трещины разрыва. Ширина их днища варьирует от 7–13 до 60–67 см с медианами 33 см на внешней и 28 см на внутренней дугах вала-диапира. В результате длина волны поперек линии микроповышений, то есть расстояние между макушками микроповышений в соседних линиях-цепочках, составляет 87–88 см (медианы), изменяясь от 36–56 до 120–140 см. Расстояние между боковыми стенками соседних микроповышений вдоль их цепочки обычно не превышает 30–40 см, при этом длина волны вдоль цепочки микроповышений варьирует приблизительно в тех же пределах, как и поперек цепочек.

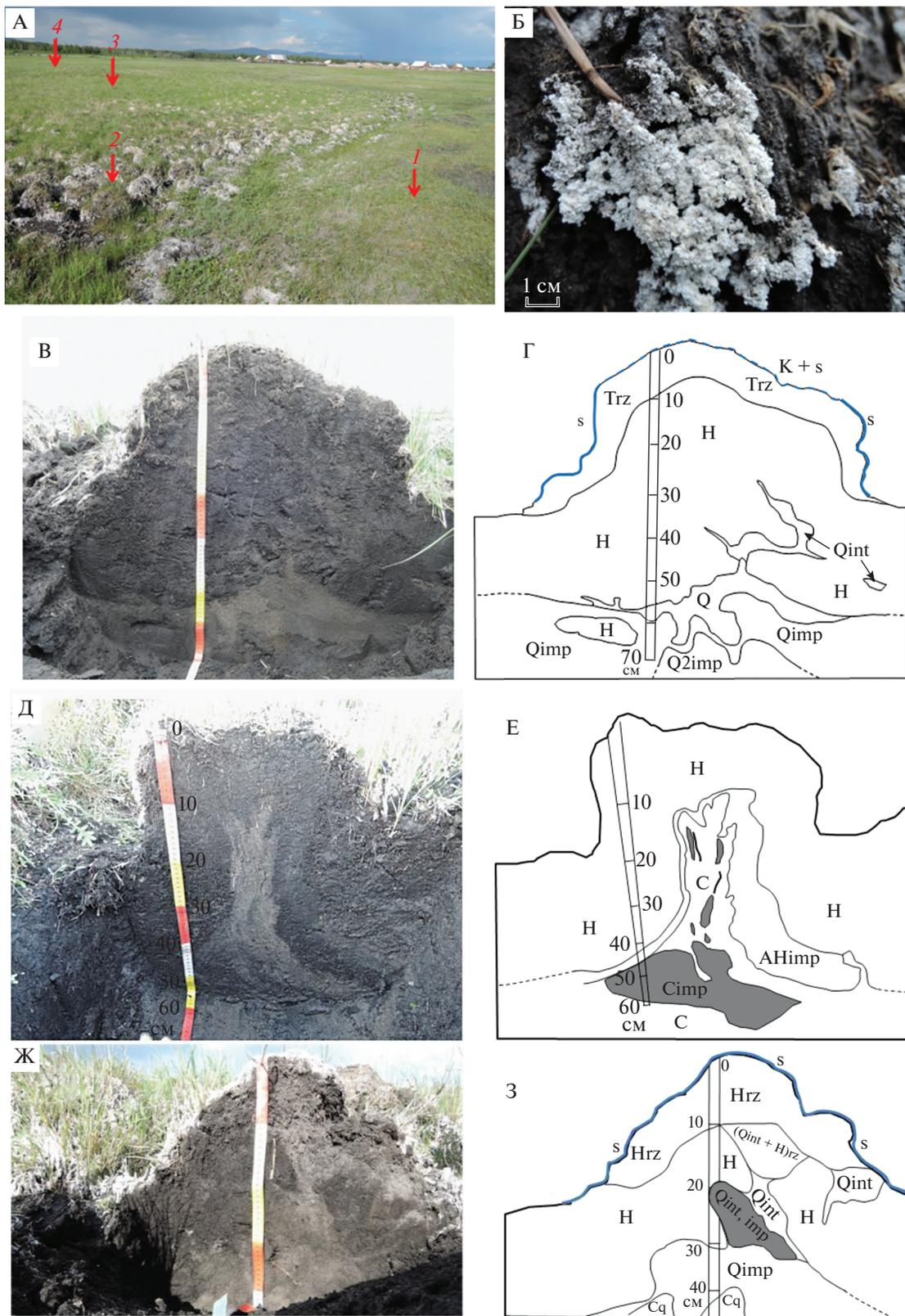
Внутреннее строение рассматриваемых микроповышений заметно отличается от строения растительных кочек на болоте, имея с последними отчетливую генетическую связь. Во-первых, микроповышения, окаймляющие вал-диапир цепочками, представлены преимущественно органогенной массой торфяного и перегнойного горизонтов,

Таблица 1. Статистические показатели морфометрических параметров микроповышений (МПВ) и микродолин (МД)

Положение	Морфометрический показатель	Значения статистических показателей*							
		<i>n</i>	min	Q1	med	Q3	max	<i>M</i>	<i>s</i>
Внешняя дуга диапира	Высота МПВ, см	31	19	27	32	36	45	31.4	6.0
	Ширина МПВ, см	31	16	22	27	34	73	30.6	13.4
	Длина МПВ, см	31	18	39	51	62	103	52.2	19.5
	Ширина днища МД, см	31	7	19	33	39	60	30.2	13.9
	Длина волны поперек линии МПВ, см	31	36	62	87	92	122	78.5	22.1
	Длина волны вдоль линии МПВ, см	31	41	62	70	100	176	85.0	38.9
	Ширина/высота МПВ	31	0.50	0.75	0.91	1.11	2.03	0.98	0.38
	Длина/ширина МПВ	31	1.06	1.24	1.58	2.29	3.33	1.83	0.71
Внутренняя дуга диапира	Высота МПВ, см	22	22	31	36	40	50	36.2	7.4
	Ширина МПВ, см	22	26	34	37	45	60	39.7	8.5
	Длина МПВ, см	22	35	46	64	85	120	69.0	25.4
	Ширина днища МД, см	22	13	24	28	36	67	31.7	14.6
	Длина волны поперек линии МПВ, см	22	56	62	88	103	140	90.5	28.8
	Длина волны вдоль линии МПВ, см	22	46	76	87	99	150	88.4	22.8
	Ширина/высота МПВ	22	0.67	0.94	1.06	1.39	2.08	1.15	0.36
	Длина/ширина МПВ	22	1.02	1.29	1.48	2.34	3.15	1.78	0.70
Склон с РФ-2-16	Высота МПВ, см	30	12	17	20	23	32	20.8	5.0
	Ширина МПВ, см	30	33	50	60	72	113	64.3	18.8
	Длина МПВ, см	30	50	92	123	145	240	118.5	44.4
	Ширина днища МД, см	30	16	24	37	56	73	40.2	18.5
	Длина волны поперек линии МПВ, см	30	73	87	104	133	155	108.8	24.1
	Длина волны вдоль линии МПВ, см	28	75	108	137	173	230	139.0	42.3
	Ширина/высота МПВ	30	1.73	2.55	3.12	3.70	6.28	3.17	0.89
	Длина/ширина МПВ	30	1.00	1.53	1.75	2.10	3.64	1.86	0.58
Вогнутая поверхность	Высота МПВ, см	57	7	10	13	16	26	13.8	4.2
	Ширина МПВ, см	57	32	53	63	82	188	70.1	27.7
	Длина МПВ, см	57	52	87	112	154	250	119.5	47.0
	Ширина днища МД, см	57	15	29	40	64	134	49.8	29.8
	Длина волны поперек линии МПВ, см	56	61	105	128	152	278	134.8	48.1
	Длина волны вдоль линии МПВ, см	33	65	107	142	185	320	151.3	60.1
	Ширина/высота МПВ	57	2.13	3.50	4.92	7.07	12.8	5.55	2.71
	Длина/ширина МПВ	57	1.02	1.29	1.60	2.08	3.79	1.79	0.69

* min – минимальное значение; Q1 – нижний квартиль (25%); med – медиана (50%); Q3 – верхний квартиль (75%); max – максимальное значение; *M* – среднее арифметическое; *s* – среднеквадратическое отклонение.

Рис. 3. Микроповышения по периферии дугообразного вала-диапира при переходе к болоту с растительными кочками. А – общий вид пояса с микроповышениями вдоль вала-диапира (восточная часть внешней дуги): 1 – вал-диапир; 2 – препарированное микроповышение (см. В, Г); 3 – часть болота с органическими кочками; 4 – более низкий вал-диапир среди болота; Б–З – микроповышения: Б – солевые выцветы на боковых стенках микроповышения; В – поперечный вертикальный срез через микроповышение РФ-2-11а на внешней краевой дуге вала-диапира (фото); Г – то же (схема); Д – поперечный вертикальный срез через микроповышение РФ-2-12 на внутренней краевой дуге вала-диапира (фото); Е – то же (схема); Ж – поперечный вертикальный срез через микроповышение РФ-2-11б (фото); З – то же (схема).



приподнятой относительно уровня кочек в болоте на 10–20 см и даже более непосредственно при переходе к склону вала-диапира. За счет этого масса горизонта Т и Н содержит меньше воды, становится более плотной. Даже в период затопления микродолин микроповышения сохраняют механическую прочность настолько, что на них можно наступать ногой. Пружинящий эффект, характерный для растительных кочек на болоте, у этих микроповышений проявляется очень слабо, а в большинстве случаев отсутствует. При надавливании они пластически деформируются.

Во-вторых, в микродолинах между цепочками микроповышений вдоль вала-диапира возле поверхности расположен перегнойный горизонт Н сравнительно небольшой мощности от 10 до 20 см, а под ним песчано-супесчаный глеевый горизонт Gimp с зонами импрегнирования органическими веществами или квазиглеевый горизонт Qimp.

В-третьих, в центральной части микроповышения наблюдаются структуры внедрения снизу вверх минерального материала в тело приподнятых горизонтов Н и Т. Конкретная форма вертикального сечения таких структур различается в зависимости от условий и мощности внедрения. При относительно слабом внедрении в основании органогенной тумбы микроповышения песчаный материал образует конус с тупым углом при вершине, а от последней вверх поднимается сужающийся и замысловато извивающийся язык песчано-пылеватого материала (рис. 3В, 3Г).

При более сильном внедрении вертикальный язык может иметь форму струи фонтана с расширяющейся в стороны верхней частью (рис. 3Д, 3Е). При еще более сильном внедрении поднимающийся песчано-пылеватый материал может образовывать сверху заполнение, напоминающее воронку, которая еще не достигла дневной поверхности, остановившись под органогенным материалом торфяного и/или перегнойного горизонтов (рис. 3Ж, 3З). В результате органогенная масса горизонта Н в средней части тумбы-микроповышения раздвигается в стороны.

Почвы в переходной полосе обеих дуг вдоль вала-диапира являются торфянисто-перегнойно-квазиглеевыми поверхностно-засоленными газогидротермально слаботорбированными на аллювиальных песчаных отложениях (Drainic Sapric Histosols (Sulfidic)). В минеральных горизонтах абсолютно доминируют песчаные фракции (75–80%), в составе которых от половины до двух третей составляет фракция мелкого песка (0.05–0.25 мм). Содержание крупной пыли (0.01–0.05 мм) варьирует от 10 до 15%, содержание ила (<0.001 мм) – 2–6%. Почвы имеют кислую реакцию среды (рН_{H₂O} 4.4–4.9) по всему профилю выше уровня грунтовой воды за счет постепенного окисления пирита после выдавливания материала вверх.

В теле микроповышения увеличиваются активность ионов натрия до 9–20 ммоль/л в жидкой фазе при влажности 30 мас. % по сравнению с 5–6 ммоль/л в термальных водах. Одновременно увеличивается активность ионов кальция в связи со сменой щелочной реакции среды на кислую.

Микроповышения с сохранившимися фрагментами органогенных горизонтов

Переход болотного массива к аллювиальной равнине имеет несколько вариантов строения. Наиболее простой из них представляет собой плавный очень пологий выход минеральных горизонтов на берег с чрезвычайно слабовыраженным микрорельефом, который со стороны болота сопровождается уменьшением размеров растительных кочек и общим уменьшением мощности органогенных горизонтов (Н и Т) вплоть до их полного выклинивания. Самая низкая часть берега аллювиальной равнины периодически затопляется после дождливого периода. Описание разреза РФ-1-5 аллювиальной светлогумусовой импрегнированной газогидротермально турбированной глеевой поверхностно-солончаковой средnezасоленной песчаной почвы (Eutric Sodic Gleyic Pantofluvic Fluvisol (Alcalic, Epiloamic, Endoarenic, Humic, Sulfidic)) с почти ровной дневной поверхностью представлено ранее [38].

Высокий подъем валов-диапиров в краевой части болота рассмотрен выше.

Помимо этих двух контрастных вариантов значительная часть области перехода представлена полосами низких кочкарных поверхностей с оплывшими минеральными микроповышениями, на макушке или на боку которых сохранились фрагменты органогенных горизонтов Т или Н (рис. S2). В более узких полосах (до 3–4 м шириной) микроповышения обычно вытянуты вдоль болота и между ними образуются сравнительно длинные микродолины (рис. S2). В более широких полосах (от 3–4 до 10–15 м) выпуклые элементы микрорельефа чередуются с вогнутыми элементами приблизительно тех же горизонтальных размеров в нерегулярном порядке близком к шахматному (рис. S2).

Микроповышения очень пологого склона от слабовыраженного вала-диапира на аллювиальной равнине в сторону замкнутого участка болотного массива

Склон имеет четко выраженный микрорельеф в виде цепочек слабовытянутых микроповышений, разделенных очень длинными микродолинами, ориентированными поперек общего уклона поверхности (рис. 4А).

Растительность представлена галофитным лугом с доминированием осоки ползучей (*Carex*

reptabunda). Особенностью фитоценоза является практически равное сочетание галофитов степной и луговой флоры. По отношению к фактору увлажнения большинство из них мезофиты. Наличие разнообразных биоморф обеспечивает стабильное, при возможных изменениях факторов среды, функционирование экосистемы.

Микроповышения имеют более плавные очертания по сравнению с тумбовидными аналогами непосредственно в зоне контакта болота с другим валом-диапиром. Верхняя их часть слабовыпуклая с более сильновыраженной кривизной верхней границы вертикального сечения в поперечном направлении по сравнению с продольным. Верхушка плавно переходит в покатые неровные боковые поверхности. Относительная высота микроповышений этой группы (склон с РФ-2-16) изменяется в пределах от 12 до 32 см с медианой 20 см, ширина – от 33 до 113 см с медианой 60 см, длина – от 50 до 240 см с медианой 123 см. В 50% случаев длина больше ширины в 1.5–2.1 раза, но встречаются как очень слабо вытянутые варианты, вплоть до округлых в плане, так и очень сильно вытянутые с отношением длина/ширина равным до 3.6. При этом микроповышения выглядят невысокими: ширина больше высоты в 1.7–6.3 раза с медианой в 3.1 раза.

Днища микродолин образуют сплошную сеть, в ячейках которой расположены микроповышения, как острова, вытянутые сериями параллельных цепочек. Ширина днищ варьирует от 16 до 73 см с медианой 37 см. За счет вытянутости микроповышений длина волны микрорельефа заметно различается в продольном и поперечном направлениях относительно направления уклона местности. Минимальные значения (73 и 75 см) практически совпадают, но все остальные непараметрические статистические показатели имеют более высокие значения длины волны вдоль линии микроповышений (направление поперек склона) по сравнению с длиной волны между соседними цепочками (направление вдоль общего склона).

Внутреннее строение микроповышений этой группы рассмотрим на примере разреза РФ-2-16. На рис. 4А стрелкой указано положение исследованного микроповышения на общем фоне микрорельефа участка. Микроповышение покрыто редкой травянистой растительностью с доминированием осоки ползучей. На макушке отчетливо выделяется овальное оголенное пятно (рис. 4Б, 4В) с длинной осью 33 см и короткой осью 18 см. Поверхность почвы на микроповышении, нижние части многих растений и 10–15% оголенного пятна покрыты белыми выцветами легкорастворимых солей (сульфат натрия).

Вертикальное сечение почвы микроповышения в поперечном направлении (рис. 4Д, 4Е) и двух микродолин, прилегающих к нему с двух

сторон (рис. 4Ж, 4З) демонстрирует сильнотурбированное строение почвенного профиля, представленное преимущественно минеральным материалом. Сплошной гумусово-перегнойный горизонт АН_{imp} с признаками импрегнирования органическими веществами из поднимающихся газогидротермальных флюидов в профиле почв отсутствует. Он разорван на куски (фрагменты) разного размера и формы выдавленным снизу песчаным, супесчаным и отчасти пылевато-суглинистым материалом глеевого (G) и квазиглеевого (Q) горизонтов с разнообразным проявлением признаков импрегнирования (*imp* и *IMP*) в виде черных пленок на поверхности минеральных зерен, а также окисленно-глеевого признака, представленного пленками гидроксидов и оксидов железа разного цвета (от бурого до красного).

Рисунок расположения морфонов вертикального сечения микроповышения очень сложный (рис. 4Е). На представленной схеме выделен 21 морфон. Вся центральная часть профиля под микроповышением образована несколькими причудливо изгибающимися, иногда разветвляющимися восходящими языками, в каждом из которых имеются буро-черные морфоны *IMP* сильного импрегнирования органическим веществом. В трех языках основная вмещающая масса состоит из сизого (Gley1 5/5G, 6/5G; Gley2 5/5BG, 6/5BG) материала глеевого горизонта. Из-за близкого расположения водоносного песчаного слоя (глубина зеркала грунтовой воды 75–80 см) основание этих языков вскрыть не удалось – стенки разреза быстро оплывали.

Один из восходящих языков пылевато-песчаного материала непосредственно выходит на поверхность микроповышения, образуя оголенное от растительности овальное пятно серо-стального цвета с пухлыми небольшими скоплениями выцветов солей. Поверхность пятна влажная, в отличие от сухой остальной части поверхности микроповышения, и очень слабо шероховатая за счет образования тонкой корочки. Такое состояние свидетельствует о текущем (в момент препарирования микроповышения – июнь 2018 г., длительный период без дождей) поступлении растворов снизу от грунтовой воды непосредственно на макушку микроповышения по особому каналу – одному из восходящих языков минерального материала. Так как все морфоны внутри тела микроповышения были влажными, а большая часть поверхности микроповышения, исключая оголенное пятно, сухая, следовательно пятно остается влажным из-за отсутствия потребления воды корнями растений.

Два восходящий языка, вмещающих импрегнированные морфоны квазиглеевого (Q2_{imp}) или глеевого (G2_{imp}) горизонтов, поднялись почти вертикально вверх, достигая поверхности

микроповышения по краям выпуклой макушки приблизительно в местах перегиба к более покатым микросклонам (рис. 4Е, 27 и 105 см по горизонтальной линейке). В их теле много вертикально ориентированных с боковыми тупиковыми ответвлениями сильноимпрегнированных морфонов IMP.

В центральной части микроповышения вскрыт сложно устроенный восходящий язык с сильнозагнутым в сторону, а затем даже немного вниз концом. Он похож на изогнутую шею с головой ящера. В его нижней части находится ядро из супесчаного морфона глеевого горизонта G1imp со слабым импрегнированием. Оно окаймляется с боков и сверху буро-черной узкой полосой с диффузными краями супесчаного сильноимпрегнированного материала IMP. Полоса сильно выгнута вверх за счет давления снизу. С обеих боковых сторон к этой полосе IMP примыкают морфоны глеевого горизонта G1 и G1imp. Верхняя изогнутая часть языка представлена морфоном квазиглеевого импрегнированного горизонта Q2imp,ox с обильными бурими пленками гидроксидов железа (окисленно-глеевый признак).

Центральная часть микроповышения между четырьмя восходящими языками заполнена песчаными обширными морфонами квазиглеевых горизонтов Q1 и Q3 (рис. 4Е, морфоны 9 и 14). Они имеют относительно однородную зеленовато-оливковую окраску во влажном состоянии (2.5Y 6/6, 5/6), которая при высыхании стенки сильно светлеет до 2.5YR 8/1–2.5Y 8/3. В Q1 и Q3 не видно признаков импрегнирования и крайне редко встречаются бурые точки или мелкие участки с железистыми пленками на зернах, но хорошо заметны мелкие золотистые пластинки пирита. Морфон Q3 выделен особо по способности очень быстро высыхать при вскрытии разреза. Он представлен средне-крупнозернистым песком, доля фракции 0.25–1.0 мм в Q3 составляет 54–56% и фракции 0.05–0.25 мм – 30–32% по сравнению обратным соотношением в Q1 – 15–23 и 54–64%, соответственно. Открытая стенка в Q3 высыхает в течение 10–15 мин, становясь очень светлой, и даже немного самопроизвольно осыпается.

Большая часть поверхностного слоя от 0 до 5–10 см микроповышения представлена пылевато-супесчаными морфонами G2 и G2s серо-стальной окраски (Gley1 7/5G сух., 5/5G вл.), содержа-

щими золотистые пластинки пирита (рис. 4Е, морфоны 4 и 6). В морфоне G2s при высыхании на поверхности открытой стенки разреза образовался белесый налет выцветов легкорастворимых солей. При этом на дневной поверхности над обоими морфонами G2 и G2s наблюдалась почти сплошная пухлая солевая корочка.

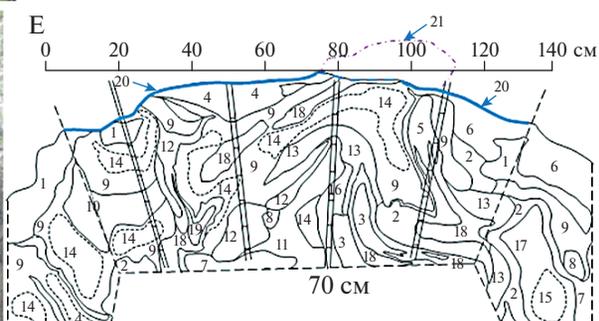
Обратим внимание, что фрагменты горизонта ANimp в виде морфонов залегают под морфонами G2 и G2s, а не наоборот, как обычно бывает в ненарушенном состоянии почвенного профиля. Это является ярким свидетельством турбационного перемещения материала профиля бывшей гумусово-перегнойно-глеевой почвы с разрывом на фрагменты исходного горизонтального сплошного залегания слоев, локальным вспучиванием поверхности, приводящим к образованию микроповышения, внутри тела которого фрагменты горизонтов были уложены в новый порядок в соответствии с величиной действовавших на них сил, их направлением, последовательностью и длительностью их действия во времени.

На боковых стенках разреза были вскрыты профили почв под двумя продольными микродолинами. Они оказались разными, отражая некоторое разнообразие их строения и, очевидно, локальной дифференциации процессов турбации в разных позициях микро рельефа.

На левой стенке разреза, характеризующей профиль почвы под микродолиной ниже по склону, сверху сохранился горизонт ANimp мощность 10–12 см (рис. 4Е, 4Ж). Под ним залежали квазиглеевые песчаные горизонты Q1 и Q3 с зернами разной крупности, аналогично рассмотренным выше морфонам Q1 и Q3 в теле микроповышения. Горизонт Q1 разделен двумя извилистыми узкими почти вертикальными языками буро-черного цвета. Это сильноимпрегнированный органическим веществом супесчаный материал IMP.

На правой стенке, характеризующей профиль почвы под микродолиной выше по склону, картина иная (рис. 4Е, 4З). С поверхности здесь залегал глеевый горизонт G2s мощностью до 15 см, прорванный в середине морфоном Q1. Под морфоном G2s располагался фрагмент горизонта ANimp причудливой формы, обязанной сочетанию двух процессов: неравномерной деформации и разрыву сплошного залегания горизонта материалом, выдавливаемым снизу, и засыпке сверху

Рис. 4. Пологий склон с регулярными поперечными цепочками микроповышений. А – общий вид склона в поперечном направлении, уклон справа налево, стрелка указывает исследуемое микроповышение; Б – внешний вид микроповышения до вскрытия; В – выцветы солей (сульфат натрия) на поверхности микроповышения и на траве; Г – оголенное пятно с солями на макушке микроповышения (увеличенный масштаб); Д – вертикальное поперечное сечение через микроповышение, фото; Е – то же, схема строения, пронумерованные индексы морфонов: 1 – ANimp; 2 – G1; 3 – G1imp; 4 – G2; 5 – G2imp; 6 – G2s; 7 – ox + G; 8 – ox; 9 – Q1; 10 – Q1imp; 11 – Q1imp,ox; 12 – Q2imp; 13 – Q2imp,ox; 14 – Q3; 15 – Q3ox; 16 – Qox1; 17 – Qox2; 18 – IMP; 19 – IMP + G; 20 – s; 21 – контур голого пятна с солями на макушке микроповышения; Ж – левая стенка разреза – вертикальное сечение вдоль поперечной микродолины ниже по склону; З – правая стенка разреза – вертикальное сечение вдоль поперечной микродолины выше по склону.



выдавленным материалом. В средней части наблюдался обширный морфон с обильными красными пленками оксидов железа (признак ох – окисленно-глеевый), а вокруг него окаймление со всех сторон, включая сверху, сизого полосатого (более темные полосы Gley2 3/10BG, 3/5BG, более светлые полосы Gley2 5/10BG, 5/5BG) морфона G1 (рис. 4E, 43). Похожие, но существенно меньших размеров, окисленно-глеевые морфоны наблюдались и под микроповышением на глубине около 70 см. Это означает, что процесс локального вспучивания почвы с образованием микроповышений и микродолин сопровождался поступлением газов, содержащих кислород, который способствовал локальному окислению восстановленных соединений железа, проходя через глеевый горизонт.

Все морфоны, расположенные выше уровня грунтовых вод, имеют кислую реакцию среды (pH_{H_2O} от 4.7 до 6.1, преимущественно около 5.2), содержание $C_{орг}$ варьирует от 0.2 до 0.7%. Почва имеет поверхностное засоление в солевой корке. На это указывает резкое (в 20 раз) увеличение активности ионов натрия и хлоридов в корке по сравнению с расположенными ниже морфонами.

Таким образом, рассмотренные микроповышения (разрез РФ-2-16) образовались в краевой части болота перед очень пологим склоном аллювиальной равнины из гумусово-перегнойно-глеевой почвы (Fluvis Oxygleyic Histis Gleysol (Arenic, Drainic, Epiprotosalic, Sulfidic)), профиль которой был разорван и турбирован газогидротермальными восходящими флюидами. Поэтому непосредственно на микроповышении почву можно назвать квазиглееземом окисленно-глеевым поверхностно-засоленным импрегнированным газогидротермально сильнотурбированным песчаным (Fluvis Oxygleyic Gleysol (Arenic, Drainic, Epiprotosalic, Sulfidic)). Неравномерность вспучивания поверхности, очевидно, связана с несколькими причинами. Во-первых, аллювиальные слоистые песчано-пылевато-суглинистые отложения, перекрывшие сверху зону пересечения двух крупных тектонических разломов и послужившие почвообразующим материалом, создали определенные затруднения фронтальному снизу вверх проникновению газов и термальных вод, что *a priori* предполагало неравномерный подъем потоков газов и воды. Во-вторых, слоистая система отложений характеризуется отличающейся способностью поглощать тем или иным способом вещества из газогидротермального потока. В качестве результата в рассматриваемых объектах в более тонких по гранулометрическому составу прослойках происходит импрегнирование органическими веществами, которое заметно увеличивает связность минерального материала и, очевидно, снижает проницаемость для воды и газов. Конфигурация сильноимпрегнированных

морфонов ИМР служит маркером зон формирования повышенного давления поднимающихся снизу флюидов и дальнейших путей перемещения материала при прорыве сдерживавшей кровли. В-третьих, система цепочек микроповышений сформировалась на очень пологом склоне от низкого широкого вала-диапира. Это означает, что основная область повышенного давления снизу возникла под валом-диапиром, подняв его целиком, по-видимому, с минимальными прорывами. Такой подъем широкой полосы слоистых отложений привел к формированию большого числа зон повышенных напряжений вдоль этой поднявшейся полосы. Последние, в свою очередь, привели к образованию нарушений сплошного залегания слоев в виде трещин, вытянутых вдоль вала-диапира с каждой его стороны, что соответствует направлению поперек образующегося склона. Закономерный результат нарушения сплошного залегания – образование цепочек фестончатых структур прорыва газами и водами сдерживающей кровли импрегнированных прослоек с перемещением пульпы из твердого материала, воды и газов вверх.

Микроповышения на наклонной слабовогнутой поверхности аллювиальной равнины

Юго-восточнее болотного массива, в который разгружаются активные Кучигерские газогидротермальные источники, расположена аллювиальная равнина. Она имеет очень пологий уклон в сторону болотного массива. В ее пределах встречаются несколько обширных слабовогнутых поверхностей с системой вытянутых микроповышений в ячеях сплошной сетки узких микродолин (рис. 5A). Слабовогнутые поверхности имеют приблизительно округлую или овальную форму с длинной осью, направленной по уклону в сторону болота. Малая ось овала изменяется от 23 до 62 м, большая ось – от 35–60 до 110–140 м.

Растительность представлена ползунковым (*Halerpestes salsuginosa*) галофитным лугом. Проективное покрытие растениями – 20%. Доминанты: *Halerpestes salsuginosa*, *Potentilla anserina*. Обилен *Taraxacum dealbatum*. Малочисленные виды: *Chenopodium glaucum*, *Juncus compressus*, *Puccinellia hauptiana*, *Plantago salsa*. В эколого-ценотической структуре преимущественно луговые растения. В биоморфологическом спектре доминирует группа короткокорневищных трав, для которых характерны жизненные стратегии с различными способами самоподдержания и адаптации к экстремальным условиям среды. По отношению к солевому фактору значительное участие играют галофитные и галотолерантные таксоны, а по отношению к влажности – мезофиты.

Микроповышения внутри таких поверхностей организованы двумя способами: концентриче-

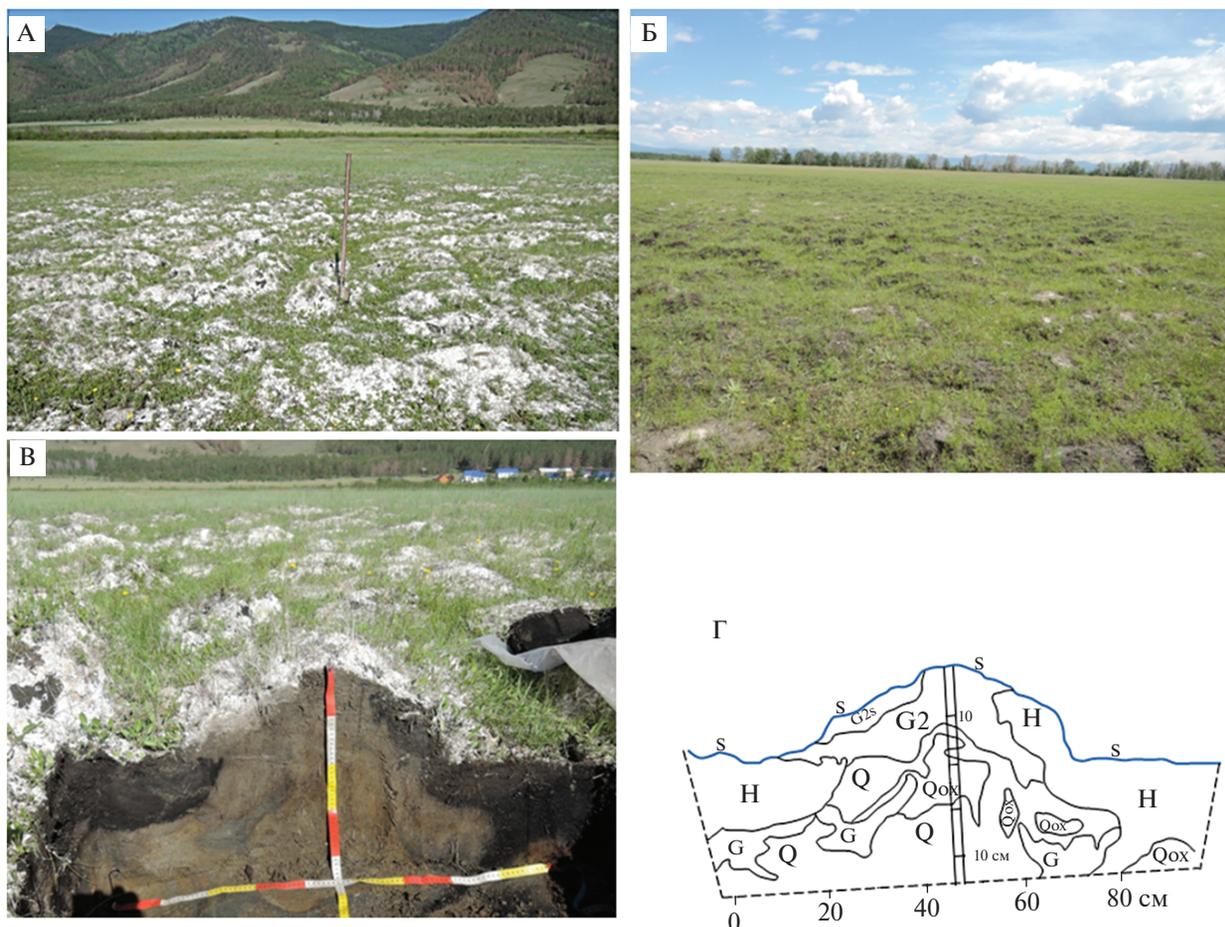


Рис. 5. Микроповышения на слабоогнутой поверхности на аллювиальной равнине. А – общий вид в сторону болота (перед дождем) с положением микроповышения до его вскрытия (рядом с лопатой); Б – общий вид от болота на аллювиальную равнину (после сильного дождя); В – фотография поперечного вертикального сечения почв через катену микроповышения между двух микродолин; Г – схема строения почвенного профиля.

скими прерывистыми кольцами вдоль внешней границы вогнутой области или слабоизвилистыми приблизительно параллельными цепочками, ориентированными поперек общего слабого уклона поверхности. Местами наблюдается переходная зона от одного способа организации к другому в пределах одной слабоогнутой поверхности.

Микроповышения обычно имеют сглаженные формы как в вертикальном, так и в горизонтальном сечениях. Высота варьирует от 7 до 26 см с медианой 13 см, длина – от 52 до 250 см (медиана 112 см), ширина – от 32 до 188 см с медианой 63 см. Микроповышения выглядят невысокими, поскольку ширина больше высоты в 2.1–12.8 раз. Длина волны поперек цепочек микроповышений составляет по медиане 128 см с разбросом от 61 до 278 см.

Строение поперечного вертикального сечения микроповышения с прилегающими микродолинами рассмотрим на примере разр. РФ-2-18 (рис. 5Б, 5В). Под микродолинами сохранилась естественная последовательность горизонтов пе-

регно-глеевой песчаной почвы (Fluvis Oxygleyic Histic Gleysol (Arenic, Epiptosalic, Sodic, Sulfidic)), состоящей из черного перегнойного горизонта Н и сизого глеевого горизонта G. Местами на глубине 35–50 см обнаруживается оливковый квазиглеевый горизонт Q с бурыми зонами пленок оксидов и гидроксидов железа (окисленно-глеевый признак ox) или без них. Глубже 50 см песчаная слоистая толща аллювиальных отложений (средний и крупный песок 20–26%, мелкий песок 48–55%, крупная пыль 15–19%, ил 2–3%) имеет сизый цвет (горизонт G) и включает мелкие пластинки пирита. Водонасыщенные горизонты начинаются с глубины 75 см.

На микроповышении сплошной горизонт Н отсутствует. Небольшой фрагмент его, как продолжение горизонта Н в микропонижении, сохранился в нижней части одного покатого бока микроповышения. Основная масса микроповышения представлена выдавленным вверх глеевым горизонтом G2 и квазиглеевым горизонтом Q и

Оох, содержащими зерна пирита. Поверхность почвы микроповышения и микродолины покрыта белой тонкой пухлой солевой корочкой (сульфат натрия). Почва идентифицирована как глеезем окисленно-глеевый поверхностно-засоленный газогидротермально сильнотурбированный песчаный на аллювиальных отложениях (Fluvis Oxygleyic Gleysol (Arenic, Epiptosalic, Sodic, Sulfidic)).

Нижняя часть глеевого горизонта, расположенная ниже уровня грунтовой воды, сохраняет сильнощелочную реакцию среды ($\text{pH} > 8.5$), тогда как дренирующая верхняя часть профиля, в которой визуальными наблюдаются зерна пирита, становится нейтральной или кислой (pH понижается до 5.4–6.8). Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ колеблется в пределах 0.34–0.84%. Легкорастворимые соли аккумулируются возле поверхности в корке. Активность ионов натрия в пасте с влажностью 30% в корке возрастает в 30–50 раз по сравнению с нижележащей песчаной массой турбированных глеевого и квазиглеевого горизонтов.

На основе наблюдаемого строения почвы можно заключить, что микрорельеф вогнутой поверхности возник в результате многочисленных прорывов снизу перегнойного горизонта с выпучиванием в виде микробугорков песчаного материала глеевого горизонта с последующим частичным окислением восстановленных форм соединений железа в выдавленной части. Близкое расположение уровня грунтовой воды обеспечивает капиллярное подтягивание растворов к поверхности с образованием солевой корочки.

Сравнение статистических кумулятивных распределений морфометрических параметров микроповышений четырех участков

На четырех участках, для которых получены эмпирические статистические показатели морфометрических характеристик микрорельефа, распределение отношения длина/ширина микроповышения оказалось практически одинаковым (рис. 6А). Этот факт отражает сходство формы по безразмерной характеристике горизонтального сечения микроповышений отличающегося строения. Учитывая сходное происхождение микроповышений, связанное с давлением газогидротермальных флюидов снизу, приводящее к локальному выдавливанию минерального материала вверх, можно допустить сравнительно узкий диапазон возникающего давления снизу и безразмерного соотношения параметров горизонтального сечения трещиновидных каналов пальчатого вида, вдоль которых развивается это давление.

Очень близкие кумулятивные распределения получены для ширины днища микродолин между цепочками микроповышений (рис. 6Б). Лишь в области перцентилей $>50\%$ наблюдается явное

расхождение двух групп кривых: (1) обе дуги возле диапира, граничащего с обеих сторон с болотом, и (2) два участка на аллювиальной равнине. Для участков, удаленных от болота, наблюдается смещение кумулятивных распределений ширины днища микродолин в сторону более высоких значений. Это означает, что в 50% случаев ближайшие расстояния между пальчатыми структурами поднимающихся газогидротермальных флюидов сравнительно небольшие (около 35–70 см) на всех четырех участках, но, по мере удаления от болота на аллювиальную равнину, увеличивается разброс значений этого показателя.

На этом общем фоне распределения длины волны микрорельефа как поперек, так и вдоль цепочки микроповышений образуют две ясные группы: (1) участки вдоль болота и (2) участки на аллювиальной равнине (рис. 6В, 6Г). На участках аллювиальной равнины (возле разреза РФ-2-16 и на вогнутой поверхности) кумулятивные распределения длины волны микрорельефа смещены на 25–35 см в сторону более высоких значений по сравнению с участками на границе болота с диапиром. Иными словами, по краям диапира возникают более частые фестончатые структуры по сравнению с участками, удаляющимися от болота на аллювиальную равнину, по-видимому, за счет удаления в сторону от осевой части тектонического разлома.

Особенности микрорельефа каждого участка отражают кумулятивные распределения длины, ширины и высоты микроповышений (рис. 6Д–6З). Наименьшие значения длины и ширины микроповышений характерны для участка внешней дуги диапира. Кумулятивные распределения тех же показателей для участка внутренней дуги диапира смещены на 10–15 см в сторону больших значений, отражая факт увеличения горизонтальных размеров микроповышений на внутренней дуге по сравнению с внешней.

Кумулятивные распределения длины и ширины микроповышений обоих участков на аллювиальной равнине почти накладываются друг на друга при сильном смещении в сторону больших значений относительно участков на переходе болота к диапиру. Величина смещения увеличивается от 10–15 см в области перцентилей $<10\%$ до 50–70 см в области перцентилей $>80\%$. Следовательно, горизонтальные размеры микроповышений на аллювиальной равнине оказались больше в 1.5–2 раза по сравнению с таковыми возле болота.

Наиболее ярко участки различаются по кумулятивному распределению высоты микроповышений, но закономерность обратная. Наиболее высокими были микроповышения внутренней дуги диапира (рис. 6Ж). Распределение высоты на участке внешней дуги диапира смещено на 4–5 см в сторону меньших значений. Еще на 8–10 см в ту

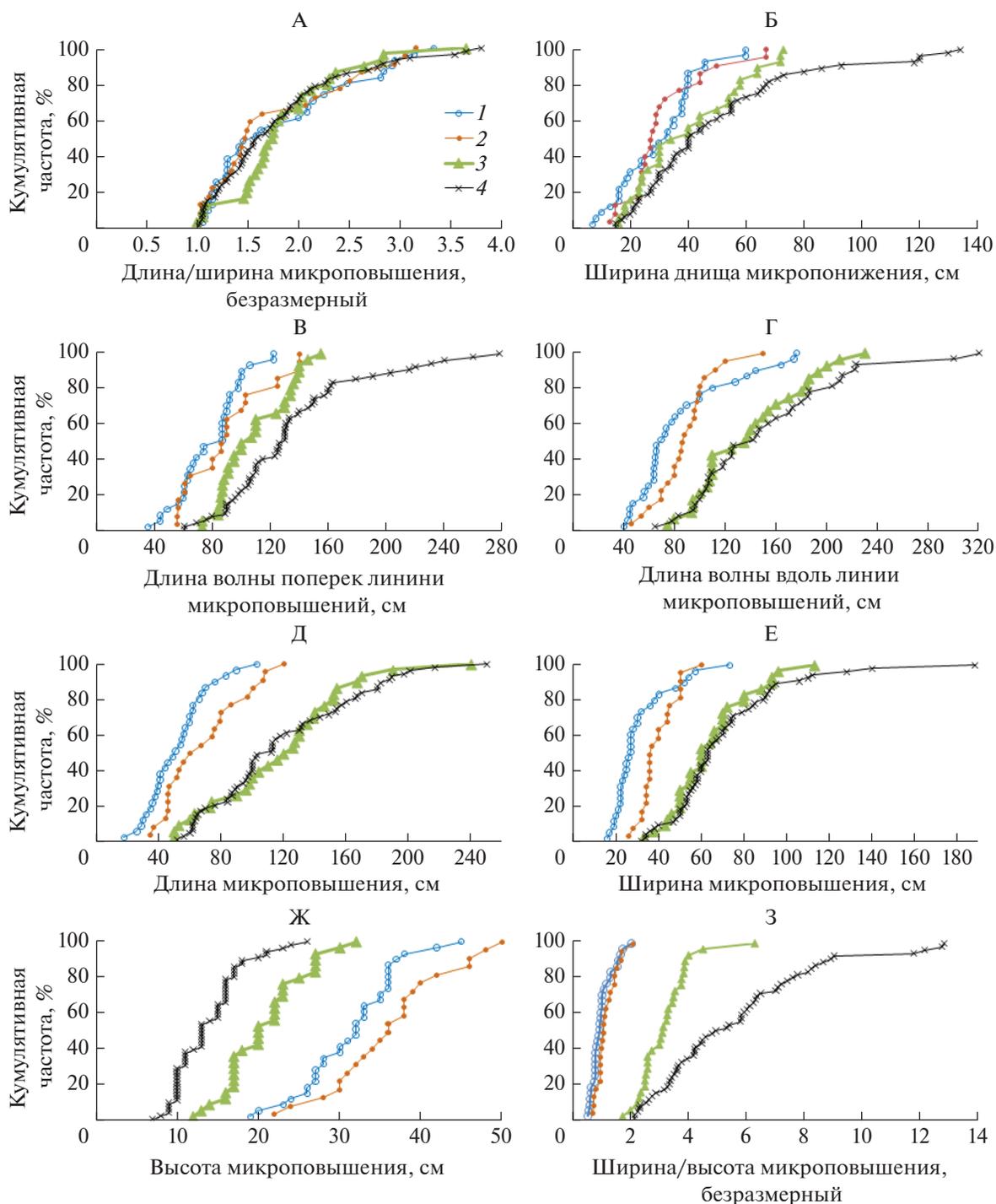


Рис. 6. Эмпирические статистические кумулятивные распределения отношения длина/ширина микроповышения (А), ширины днаща микродолин (Б), длины волны поперек (В) и вдоль цепочки микроповышений (Г), длины (Д), ширины (Е), высоты (Ж) микроповышения и отношения ширина/высота микроповышения (З). Участки: 1 – внешняя дуга диапира; 2 – внутренняя дуга диапира; 3 – склон с разр. РФ-2-16; 4 – вогнутая поверхность на аллювиальной равнине.

же сторону смещено распределение высоты участка с разр. РФ-2-16. Наименьшие значения наблюдались на вогнутой поверхности, дальше всех расположенной относительно края болота на аллювиальной равнине.

Интересную информацию несет безразмерное отношение ширина/высота микроповышения. Оно характеризует косвенно крутизну склонов и в целом эмоциональное восприятие микроповышения. Кумулятивные распределения этого отно-

Таблица 2. Некоторые физико-химические свойства почв микроповышений

Горизонт, глубина, см	рН Н ₂ O	%				Активность иона в пасте влажностью 30 мас. %, ммоль/л			
		ППП	C _{орг}	N _{общ}	Сухой остаток	F ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺
РФ-2-11, торфянисто-перегнойно-квасилглевая поверхностно-засоленная газогидротермально слабобугрированная на аллювиальных песчаных отложениях (Drainic Sapric Histosols (Sulfidic))									
Корка, 0–0.5	4.9	40.4	–	–	–	–	–	–	–
ТН, 0.5–5	4.8	33.8	7.75	0.89	3.79	0.12	1.29	19.50	2.29
Н, 5–20	4.9	23.6	5.90	0.47	0.52	0.12	0.98	9.77	0.83
Н, 20–35	4.7	23.7	3.69	0.31	0.68	0.08	0.85	9.55	1.00
Н, 35–50	4.8	24.6	5.32	0.42	0.38	0.09	0.89	9.33	1.12
Q, 50(55)–60	4.4	1.2	0.25	0.06	0.17	0.08	0.43	11.75	0.54
Q _{imp} , 70–78	4.5	2.9	0.45	0.05	0.48	0.10	0.65	12.59	0.85
РФ-2-16, квазилгезем окисленно-глеевый поверхностно-засоленный импрегнированный газогидротермально сильнобугрированный песчаный (Fluvis Oxugleyic Gleysol (Arenic, Drainic, Epiptrosalic, Sulfidic))									
Корка, 0–1	4.7	2.3	0.70	0.08	0.95	0.10	26.30	263.03	0.28
Q1, 1–7	6.1	–	0.18	0.03	0.20	0.79	0.71	11.48	0.01
Q3, 7–13	5.9	–	0.19	0.03	0.18	0.42	0.37	14.79	0.07
Q2 _{imp} , ox, 13–20	5.4	1.7	0.29	0.04	0.28	0.23	0.74	11.48	0.07
Q1 _{imp} , ox, 20–40	5.1	1.6	0.50	0.04	0.42	0.15	0.56	11.75	0.09
Q1 _{imp} , ox, 40–65	5.2	2.3	0.14	0.02	0.74	0.11	1.51	8.71	0.30
РФ-2-18, глеезем окисленно-глеевый поверхностно-засоленный газогидротермально сильнобугрированный песчаный на аллювиальных отложениях (Fluvis Oxugleyic Gleysol (Arenic, Epiptrosalic, Sodc, Sulfidic))									
Корка, 0–0.5	6.8	5.6	–	–	–	1.41	102.33	562.34	0.93
G2, 0.5–5	6.8	3.2	0.74	0.08	0.84	1.10	2.88	58.88	0.13
G2, 5–15	5.9	2.4	0.60	0.04	0.28	0.62	0.81	16.98	0.22
Q _{ox} , 15–25	5.6	2.2	0.50	0.03	0.19	0.40	0.60	14.79	0.40
Q, 25–40	5.7	1.5	0.46	0.03	0.32	0.37	1.07	13.49	0.26
G, 45–59	6.4	0.1	0.34	0.04	0.354	0.51	1.29	12.30	0.09
G, 59–65	8.1	–	0.84	0.04	0.734	0.34	3.80	22.39	0.24
G, 75–85	9.1	2.3	0.53	0.06	0.500	0.69	3.80	8.91	0.03

Примечание. ППП – потеря при прокаливании, прочерк – нет данных.

шения для обеих дуг возле диапира имеют общий диапазон разброса значений от 0.5 до 2 и почти совпадают друг с другом. Значения отношения ширина/высота около единицы свидетельствует о тумбовидной форме микроповышений с крутыми, часто почти отвесными боковыми сторонами. Цепочки таких микроповышений выглядят как ряд низких толстых столбиков или пней.

Распределения двух участков на аллювиальной равнине сильно смещены в сторону больших значений, образуя своеобразный веер. По мере удаления от болота, отношение ширина/высота микроповышения увеличивается. Это означает, что микроповышения становятся похожими сначала на сильновыпуклую шляпку гриба, которая, по мере удаления от болота, постепенно расплющивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На северо-востоке Баргузинской котловины условия распространения участков с сильновыраженным микрорельефом и строение почв на этих участках позволяют считать, что в области перехода от болотного массива с активными грифонами термальных вод к аллювиальной равнине формируются фестончатые структуры турбированных почв под воздействием восходящих потоков газогидротермальных флюидов. Эти структуры образуют генетический ряд микроповышений. На краю болота микроповышения состоят из органогенного материала с редкими внедрениями снизу минерального материала. По мере уменьшения мощности органогенных горизонтов при переходе на пологий склон аллювиальной равнины микроповышения возникают на месте прорыва поверхностных горизонтов материалом глеевого горизонта, выдавленного снизу вверх. При этом тумбовидные резко возвышающиеся кочки на краю болота постепенно приобретают более сглаженные низкие слабовыпуклые формы бугорков с широким основанием на вогнутых поверхностях аллювиальной равнины.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-04-00454 А.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Длинный дугообразный вал-диапир при переходе к болоту с растительными кочками: А – вид с востока на запад приблизительно с 1/3 его длины; В – восточный концевой участок (в противоположную сторону с предыдущей точки съемки); С – срединная часть вала, вид на восток приблизительно с 1/4 его длины; D – западный концевой участок (в противоположную сторону с предыдущей точки съемки).

Рис. S2. Микроповышения с сохранившимися фрагментами органогенных горизонтов: А, С, Е, G –

фотографии микрорельефа; В, D, F, H – отдельные микроповышения; А, В – ареал СПП-2; С, D – ареал СПП-7; Е, F – ареал СПП-17; G, H – ареал СПП-24.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
3. *Басков Е.А., Суриков С.Н.* Гидротермы Земли. Л.: Недра, 1989. 243 с.
4. *Вилор Н.В., Андрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С.* Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. № 1. С. 64–82. <https://doi.org/10.7868/S0016752514110107>
5. *Геннадиев А.Н., Гептнер А.Р., Жидкин А.П., Чернянский С.С., Пиковский Ю.И.* Экзотемпературные и эндотемпературные почвы Исландии // Почвоведение. 2007. № 6. С. 661–675.
6. *Герасимова М.И.* Классификация почв России: путь к следующей версии // Почвоведение. 2019. № 1. С. 32–42. <https://doi.org/10.1134/S0032180X190010027>
7. *Гольдфарб И.Л.* Влияние гидротермальной деятельности на условия формирования и морфологический облик почв (на примере основных гидротермальных систем Камчатки) // Почвоведение. 1996. № 12. С. 1413–1419.
8. *Гольфарб И.Л.* Влияние гидротермального процесса на почвообразование (на примере Камчатки). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2005. 25 с.
9. *Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О.* Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5–19. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010040>
10. *Жамбалова А.Д.* Засоленные почвы зон разломов Кучигерских гидротерм и их геохимические особенности. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2018. 22 с.
11. *Завадская А.В., Семенов И.Н., Крупская В.В., Закусин С.В., Паничева Д.М.* Трансформация почвенного и растительного покровов термальных экосистем под действием температурного фактора (на примере длины реки Гейзерной, Кроноцкий заповедник) // Тр. Кроноцкого гос. природного заповедника. Петропавловск-Камчатский, 2017. Т. 5. С. 26–39.
12. *Замана Л.В.* Мерзлотно-гидрогеологические и мелиоративные условия Баргузинской впадины. Новосибирск: Наука, 1988. 126 с.
13. *Исаев В.П.* Природные газы Баргузинской впадины. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 2006. 220 с.
14. *Касимов Н.С.* Геохимия ландшафтов зон разломов (на примере Казахстана). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 119 с.

15. *Клещева Е.А.* Индикационные особенности растен- ний юга Сибири по отношению к фактору увлажнения почвы // *Экология*. 2010. № 6. С. 425–431.
16. *Корнблом Э.А., Михайлов И.С., Ногина Н.А., Таргу- льян В.О.* Базовые шкалы свойств морфологиче- ских элементов почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1982. 55 с.
17. *Костюг Д.Н., Геннадиев А.Н.* Почвы и почвенный покров долины гейзеров // *Почвоведение*. 2014. № 6. С. 643–653. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14060069>
18. *Лунина О.В., Gladkov A.C., Неведрова Н.Н.* Рифто- вые впадины Прибайкалья: тектоническое строе- ние и история развития. Новосибирск: Академи- ческое изд-во “Гео”, 2009. 316 с.
19. *Лысак С.В.* Тепловой поток в зонах активных раз- ломов на юге Восточной Сибири // *Геология и гео- физика*. 2002. Т. 43. № 8. С. 791–803.
20. *Лысак С.В.* Тепловой поток континентальных рифтовых зон. Новосибирск: Наука, 1988. 200 с.
21. *Мальшев Л.И.* Особенности и генезис флоры Си- бири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1984. 264 с.
22. *Методы изучения лесных сообществ.* СПб.: НИИ- Химии СПбГУ, 2002. 240 с.
23. *Найданов Б.Б., Бадмаева Н.К., Аненхонов О.А., Пы- халова Т.Д.* Галофитная растительность Западного Забайкалья: Флора и синтаксономия // *Раститель- ный мир Азиатской России*. 2010. № 2(6). С. 66–72.
24. *Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д., Данилова Э.В., Брянская А.В., Бурюхаев С.П., Гармаев Е.Ж., Горлен- ко В.М., Дагурова О.П., Дамбаев В.Б., Зайцева С.В., Замана Л.В., Хахинов В.В., Татаринов А.В.* Геохи- мическая деятельность микроорганизмов Бай- кальской рифтовой зоны. Новосибирск: Академи- ческое изд-во “Гео”, 2011. 302 с.
25. *Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токарен- ко О.Г., Чернявский М.К.* Гидрогеохимические осо- бенности состава азотных терм Байкальской риф- товой зоны // *Геология и геофизика*. 2013. № 5. С. 647–664.
26. *Полевой определитель почв России.* М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
27. *Почвы Баргузинской котловины.* Новосибирск: Наука, 1983. 270 с.
28. *Разумова В.Н.* Древние коры выветривания и гид- ротермальный процесс. М.: Наука, 1977. 156 с.
29. *Самкова Т.Ю., Рылова С.А., Кляпицкий Е.С.* Про- странственная неоднородность термального поля и ее отражение в структуре растительного покрова юго-восточного участка Больше-Банного место- рождения (Южная Камчатка) // *Вестник Краунц. Науки о Земле*. 2016. № 3. Вып. 31. С. 18–27.
30. *Семенков И.Н., Завадская А.В., Крупская В.В., Заку- син С.В., Клиник Г.В., Паничева Д.М.* Трансформа- ция почвенного и растительного покрова в местах разгрузки гидротермальных вод долины реки Гей- зерной (Кроноцкий государственный заповедник) // *Материалы докл. Первой открытой конф. моло- дых ученых “Почвоведение: горизонты будущего”, посвященной 90-летию института.* Т. 1. М., 2017. С. 24–28.
31. *Серебряков И.Г.* Экологическая морфология расте- ний. Жизненные формы покрытосеменных и хвойных. М.: Высш. школа, 1962. 377 с.
32. *Серебряков И.Г.* Жизненные формы высших расте- ний и их изучение // *Полевая геоботаника*. М., 1964. Т. 3. С. 146–205.
33. *Солнцева Н.П., Гольдфарб И.Л.* Геохимические осо- бенности ландшафтов современных парогидро- термальных месторождений Камчатки (на приме- ре Паужетского месторождения) // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, География*. 1994. № 2. С. 65–73.
34. *Татаринов А.В., Ялович Л.И., Канакин С.В.* Особе- нности формирования и минеральные ассоциации литокомплексов грязевых вулканов на юге Восточ- ной Сибири // *Вулканология и сейсмология*. 2016. № 4. С. 34–49. <https://doi.org/10.7868/S0203030616030056>
35. *Толмачев А.И.* Введение в географию растений. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1974. 244 с.
36. *Убугунов В.Л., Хитров Н.Б., Убугунова В.И., Жамба- лова А.Д., Рупышев Ю.А., Аюшина Т.А., Парамоно- ва А., Цыремпилов Э.Г., Насатуева Ц.Н.* Эндоген- ный фактор и морфогенетическое строение почв в зоне влияния Кучигерских гидротерм (Байкаль- ская рифтовая зона, север Баргузинской котлови- ны) // *Природа внутренней Азии. Nature of Inner Asia*. 2018. № 4. С. 54–72. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2018-4-54-72>
37. *Функционирование субарктической гидротер- мальной экосистемы в зимний период /* Под ред. Боголицына К.Г., Болотова И.Н. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 252 с.
38. *Хитров Н.Б., Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Рупы- шев Ю.А., Аюшина Т.А., Жамбалова А.Д., Цыремпи- лов Э.Г., Парамонова А.Е., Насатуева Ц.Н.* Морфо- логическое строение почв в ближайшей зоне влияния Кучигерских гидротерм (Баргузинская котловина) // *Почвоведение*. 2019. № 12. С. 1430–1453. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120074>
39. *Чернявский М.К.* Геоэкологические особенности термальных источников Баргузинского Прибай- калья и использование их в бальнеологических це- лях. Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Улан- Удэ, 2006. 22 с.
40. *Чернявский М.К., Плюснин А.М., Дорошкевич С.Г., Будаев Р.Ц.* Рекреационно-бальнеологические осо- бенности северо-восточной части Баргузинской кот- ловины // *География и природные ресурсы*. 2018. № 2. С. 63–72. <https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2>
41. *Шеляг-Сосонко Ю.Р.* Очерк флоры и растительно- сти Ялтинского горно-лесного государственного заповедника // *Ботанический журн.* 1978. Т. 63. № 10. С. 1430–1439.
42. *Эллис А.Дж.* Исследованные геотермальные систе- мы // *Геохимия гидротермальных рудных место- рождений.* Пер. с англ. М.: Мир, 1982. С. 497–534.
43. *Юрцев Б.А.* Флора Сунтар-Хаята: проблемы истори- ии высокогорных ландшафтов северо-востока Сибири. Л.: Наука, 1968. 235 с.
44. *Armstrong D.C.* Acid sulphate alteration in a magmatic hydrothermal environment, Barton Peninsula, King

- George Island, Antarctica // *Mineralogical Magazine*. 1995. V. 59. P. 429–441.
45. *Bockheim J.G., Ballard T.M.* Hydrothermal soils of the crater of Mt. Baker // *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 1975. V. 39. P. 997–1001.
46. *Burns B.* Vegetation change along a geothermal stress gradient at the Te Kopia steamfield // *J. Royal Soc. New Zealand*. 1997. V. 27. P. 279–293. <https://doi.org/10.1080/03014223.1997.9517539>
47. *Byrdina S., Grandis H., Sumintadireja P., Caudron C., Syahbana D.K., Naffrechoux E., Gunawan H., Suantika G., Vandemeulebrouck J.* Structure of the acid hydrothermal system of Papandayan volcano, Indonesia, investigated by geophysical methods // *J. Volcanology Geothermal Res.* 2018. V. 358. P. 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.008>
48. *Cross D.* Soils and geology of some hydrothermal eruptions in the Waiotapu District // *New Zealand J. Geol. Geoph.* 1963. V. 6. P. 70–87.
49. Guidelines for soil description. Fourth edition. FAO. Rome, 2006. 97 p.
50. *Gwynn M., Allis R., Hardwick C., Hill J., Moore J.* A New Look at the Thermal Regime Around Roosevelt Hot Springs, Utah // *GRC Transactions*. V. 40. 2016. P. 551–558.
51. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports № 106. FAO, Rome. 192 p.
52. *Lloyd E.F.* The hot springs and hydrothermal eruptions of Waiotapu // *New Zealand J. Geol. Geoph.* 1959. V. 2. P. 141–176.
53. *Maussen K., Villacorte E., Rebadulla R.R., Maximo R.P., Debaille V., Bornas Ma.A., Bernard A.* Geochemical characterization of Taal volcano-hydrothermal system and temporal evolution during continued phases of unrest (1991–2017) // *J. Volcanology Geothermal Res.* 2018. V. 352. P. 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.01.007>
54. *Neale C.M.U., Jaworowski C., Heasler H., Sivarajan S., Masih A.* Hydrothermal monitoring in Yellowstone National Park using airborne thermal infrared remote sensing // *Remote Sensing Environ.* 2016. V. 184. P. 628–644. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.016>
55. *Rodman A.W., Shovic H.F., Thoma D.* Soils of Yellowstone National Park. Yellowstone Center for Resources, Yellowstone National Park, Wyoming, YCR-NRSR-96-2. 1996. 324 p.
56. *Schoen R., White D.E., Hemley J.J.* Argillization by descending acid at Steamboat Springs, Nevada // *Clays and Clay Minerals*. 1974. V. 22. P. 1–22.
57. *Stoffregen R.* Genesis of Acid-Sulfate Alteration and Au–Cu–Ag Mineralization at Summitville, Colorado // *Economic Geology*. 1987. V. 82. P. 1575–1591. [https://doi.org/0361-0128/87/726/1575-17\\$2.50](https://doi.org/0361-0128/87/726/1575-17$2.50)
58. *Trettin C.C., Bartelli L.J.* Characterization of Soils in Yellowstone National Park // *University of Wyoming National Park Service Research Center Annual Report*. V. 6, Article 25. 1982. P. 133–136. http://repository.uwyo.edu/uwnpsrc_reports/vol6/iss1/25
59. *Vucetich C.G., Wells N.* Soils, agriculture, and forestry of Waiotapu Region, Central North Island, New Zealand (Guthrie, Waiotapu, Rerewhakaaitu, Atiamuri, Reporoa Districts) // *New Zealand Soil Bureau Bulletin*. V. 31. Wellington, 1978. 100 p.
60. *Wilson G.W., Fredlund D.G., Barbour S.L.* The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces // *Can. Geotechnical J.* 1997. V. 34. P. 145–155.

Genetic Sequence of Microhighs in the Region with Gas-Hydrothermal Turbation of Soils

N. B. Khitrov^{1,*}, V. L. Ubugunov², V. I. Ubugunova², Yu. A. Rupyshev², T. A. Ayushina², A. D. Zhambalova², E. G. Tsyrempilov², A. E. Paramonova², and Ts. N. Nasatueva²

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670037 Russia*

**e-mail: khitrovn@gmail.com*

Ground banks and hillock-like microhighs of unclear genesis were found along swamp border and at the concave swampy surfaces of alluvial plain in the region of Kuchiger hydrothermal springs at the northern part of Barguzin Depression (Buryatia). Classic formation of hillock in grassy swamp is replaced by diapir formation due to the pressure of uprising gas-hydrothermal fluids from seismically active Plutonic fault. Morphological and some other properties of soils of the transitional sites from swamp with active hydrothermal springs to alluvial plain with well expressed microrelief composed of microhigh chains and a network of microvalleys are described. The empirical statistical cumulative distribution curves of microrelief morphometric parameters were obtained. The studied microhighs form a genetic sequence of gas-hydrothermal turbated soils comprising organic variants with minimal intrusion of sandy material from below at the swamp border and predominantly mineral soils with an upward pushed gley horizon with different degree of oxidation at the alluvial plain.

Keywords: Baikal Rift Zone, gas-hydrothermal fluids, soil morphology, microrelief, soil salinity, pyrite