

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.34:551.89

**МИКРОРЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД:
СТРОЕНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ**

А.В. Лупачев^{1,3}, С.В. Губин¹, А.А. Веремеева¹, Д.А. Каверин², А.В. Пастухов², А.С. Якимов³

¹*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Пушкино, ул. Институтская, 2, Россия; a.lupachev@gmail.com*

²*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия*

³*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия*

Рассмотрено влияние микрорельефа дневной поверхности, комплексности почвенно-растительного покрова, литологической неоднородности деятельного слоя, пространственных различий строения и теплофизических свойств переходного слоя многолетнемерзлых пород на формирование строения микрорельефа поверхности многолетней мерзлоты в различных районах криолитозоны. Выявлено, что последний в значительной мере влияет на накопление, перераспределение, обмен и вынос вещества и энергии в ходе функционирования криогенных экосистем. При формировании микрорельефа поверхности мерзлоты изменяются свойства отдельных участков верхних слоев мерзлых пород, создаются условия для современной криоконсервации или, наоборот, включения в современный биогеохимический круговорот различных форм органического вещества, биофильных элементов, загрязняющих веществ, жизнеспособной биоты и т. д.

Микрорельеф кровли многолетнемерзлых пород, почвенно-мерзлотный комплекс, мерзлотные почвы, криоконсервация, органическое вещество, антропогенные нарушения мерзлотных почв

MICRORELIEF OF THE PERMAFROST TABLE: STRUCTURE AND ECOLOGICAL FUNCTIONS

A. V. Lupachev^{1,3}, S. V. Gubin¹, A. A. Veremeeva¹, D. A. Kaverin², A. V. Pastukhov², A. S. Yakimov³

¹*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science, RAS,
142290, Puschino, Institutskaya str., 2, Russia; a.lupachev@gmail.com*

²*Institute of Biology, Komi SC, UB RAS, 167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28, Russia*

³*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia*

Surface microrelief structure, complexness of soil-vegetation cover, lithological heterogeneity of the active layer, spatial differences of thermal properties of different elements of transient layer and other factors are responsible for the complicated pattern of permafrost table microrelief. This relief determines accumulation, redistribution and removal of matter and energy from the ecosystem. Spatial difference in structure and properties of the upper layer of permafrost may lead to the cryoconservation of organic matter, biophylic elements, contaminants, viable biota or, contrarily, this material may thaw and contribute into the modern biogeochemical cycle.

Microrelief of the permafrost table, soil-cryogenic complex, cryosols, cryoconservation, organic matter, anthropogenic impact on cryosols

ВВЕДЕНИЕ

Характеристика строения и качественного состава верхней части толщи многолетнемерзлых пород (ММП) приведена в многочисленных трудах российских и зарубежных криолитологов и почвоведов, проводивших исследования в различных районах криолитозоны [Романовский, 1977; Шполянская, 1978; Суходровский, 1979; Шур, 1988; Васильевская и др., 1993; Основы геокриологии, 1995; Харрис, 2005; Горячкин, 2006; Vockheim, Hinkel, 2005; Buteau et al., 2005; Shur et al., 2005]. Одна-

ко четкое понимание взаимоотношения рельефа и почвенно-растительного покрова дневной поверхности с рельефом поверхности мерзлоты на мезо- и микроуровнях до сих пор отсутствует, несмотря на очевидную тесную их взаимосвязь. Важной методической особенностью является то, что глубина сезонноталого слоя (СТС) преимущественно отображалась как относительная величина без учета рельефа дневной поверхности [Иванова, 1962; Вадюнина, Худяков, 1983; Худяков, 1983; Ва-

сильевская и др., 1993]. Детализированные исследования, учитывающие абсолютную мощность СТС, показали, что строение микрорельефа поверхности ММП зависит от множества факторов: сомкнутости растительного покрова, мощности органогенных горизонтов, интенсивности процессов криогенного массообмена и др. [Лупачев, Губин, 2008; Kokelj et al., 2007].

Первые представления о строении и экосистемном значении рельефа поверхности ММП на мезоуровне были опубликованы Ю.А. Ливеров-

ским [1934], указывавшим на большую величину показателя “прихотливости подземного рельефа поверхности вечной мерзлоты” для объяснения хода солифлюкционных процессов. Позже эти представления получили более обоснованное фактическое подтверждение, в том числе на микроуровне [Пукемо, 1987; Lewkowicz, Clarke, 1998; Ostroumov et al., 1998].

В зональном аспекте проблема взаимоотношения микрорельефа дневной поверхности и поверхности ММП частично раскрывается в рабо-

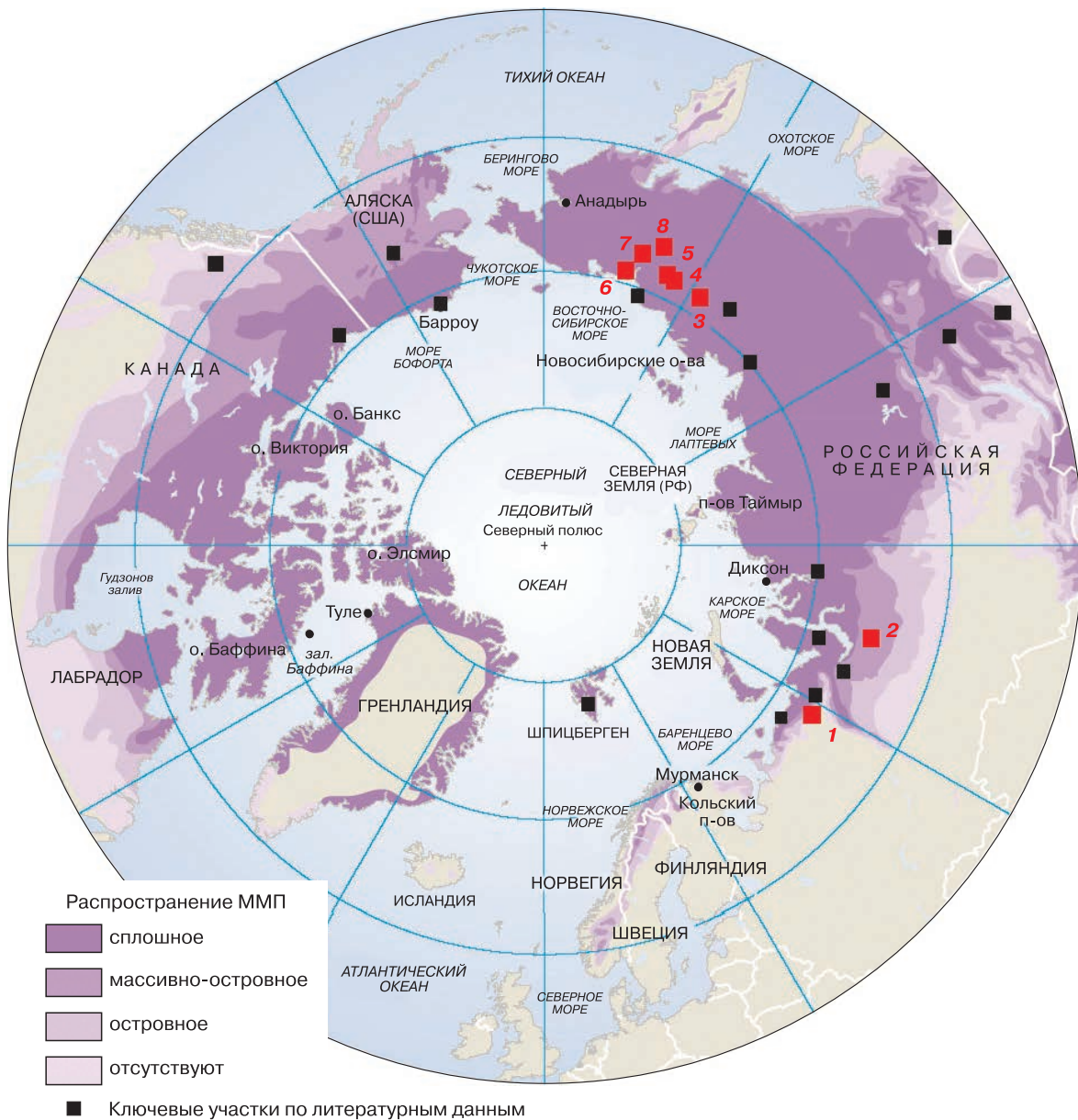


Рис. 1. Расположение ключевых участков исследования на картосхеме распространения ММП [Brown et al., 1997]:

1 – р. Аяч-Яха, 2 – ст. Надым, 3 – р. Аллаиха, 4 – р. Хомус-Юрях, 5 – р. Алазея, 6 – заим. Курьишка, 7 – руч. Комарок, 8 – р. Омолон.

тах исследователей тундровой зоны (в пределах сплошного распространения мерзлоты и небольшой (до 1–1.5 м) мощности СТС) [Кондратьева, Труш, 1961; Мелентьев, 1968; Наумов, 1974; Шаранова, 1987; Шаманова, 1991; Ostroumov et al., 1998]. Южнее, при переходе к зонам лесотундры и тайги, а также к областям островного распространения ММП с закономерным увеличением мощности СТС количество подобных исследований снижается [Эпштейн, 1961; Заболотник, Климовский, 1966; Казанцева, 2007; Мажитова, Каверин, 2007; Harris, 1998].

Большое значение для решения вопроса о генезисе и функционировании микрорельефа поверхности ММП имеют отдельные публикации участников международной программы Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM), где приводятся результаты подробных измерений глубины протаивания – серийно в течение летнего сезона, с различным шагом измерений, с учетом строения микрорельефа дневной поверхности, с фиксацией ежегодной просадки грунта, с анализом строения

почвенно-растительного покрова и т. п. [Федоров-Давыдов и др., 2004а,б; Мажитова, Каверин, 2007; Комплексный мониторинг..., 2012; Hinkel, Nelson, 2003; Fyodorov-Davydov et al., 2004; Mazhitova et al., 2004; Zamolodchikov et al., 2004].

Целью настоящего исследования стало определение основных закономерностей строения микрорельефа поверхности ММП, обуславливающих их факторов, выявление региональных особенностей строения данного микрорельефа, а также установление характера его влияния на пространственное перераспределение вещества и энергии в криогенных экосистемах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ключевые участки располагались в зонах сплошного и островного распространения ММП в Европейском, Западно-Сибирском и Северо-Восточном секторах криолитозоны на территории России (рис. 1; см. таблицу). Изучение строения микрорельефа ММП на исследуемых участках проводилось в сроки, наиболее приближенные к

Физико-географические характеристики ключевых участков исследования

№ п/п	Ключевой участок; координаты	Природная зона/подзона	Положение профилей нивелирования в мезорельефе	Почвообразующие породы	Распространение ММП	Средне-многолетняя мощность СТС, см	Растительный покров. Почвы
1	Р. Аяч-Яха; 67°35' с.ш., 64°10' в.д.	Южная тундра	Пологий склон	Средние пылеватые суглинки	Массивно-островное	79.7	Кустарничково-ивовый лишайниково-моховый. Глееземы криометаморфические
2	Стац. Надым; 65°20' с.ш., 72°55' в.д.	Северная тайга	Плато плоскобугристого торфяника	Органогенные, подстилаются заиленными песками	Островное	130.9	Кустарничково-ивовый лишайниково-моховой. Органогенные торфяные почвы
3	Р. Аллаиха; 70°33' с.ш., 147°26' в.д.	Южная тундра	Водораздел – пологий склон – крутой склон	Пылеватые суглинки	Сплошное	47.0	Злаково-ивово-кустарничковый зеленомошно-лишайниковый. Криоземы
4	р. Хомус-Юрях; 70°00' с.ш., 153°36' в.д.	Типичная тундра	Водораздел – пологий склон	То же	То же	52.5	Злаково-кустарничковый лишайниково-зеленомошный. Криоземы криометаморфические
5	Р. Алазея; 69°19' с.ш., 154°58' в.д.	Та же	То же	»	»	50.8	Злаково-кустарничковый лишайниково-зеленомошный. Криоземы криометаморфические
6	Займ. Курьишка; 69°28' с.ш., 161°47' в.д.	»	Водораздел	»	»	44–46	Злаково-кустарничковый лишайниково-зеленомошный. Криоземы криометаморфические
7	Руч. Комарок; 68°44' с.ш., 161°25' в.д.	Северная тайга	Пологий склон	»	»	106–108	Ивово-кустарничковое лишайниково-зеленомошное лиственничное редколесье. Глееземы, криоземы
8	Р. Омолон; 68°43' с.ш., 158°54' в.д.	Та же	Водораздел	»	»	41.0	Ивово-кустарничковое лишайниково-зеленомошное лиственничное редколесье. Глееземы, криоземы

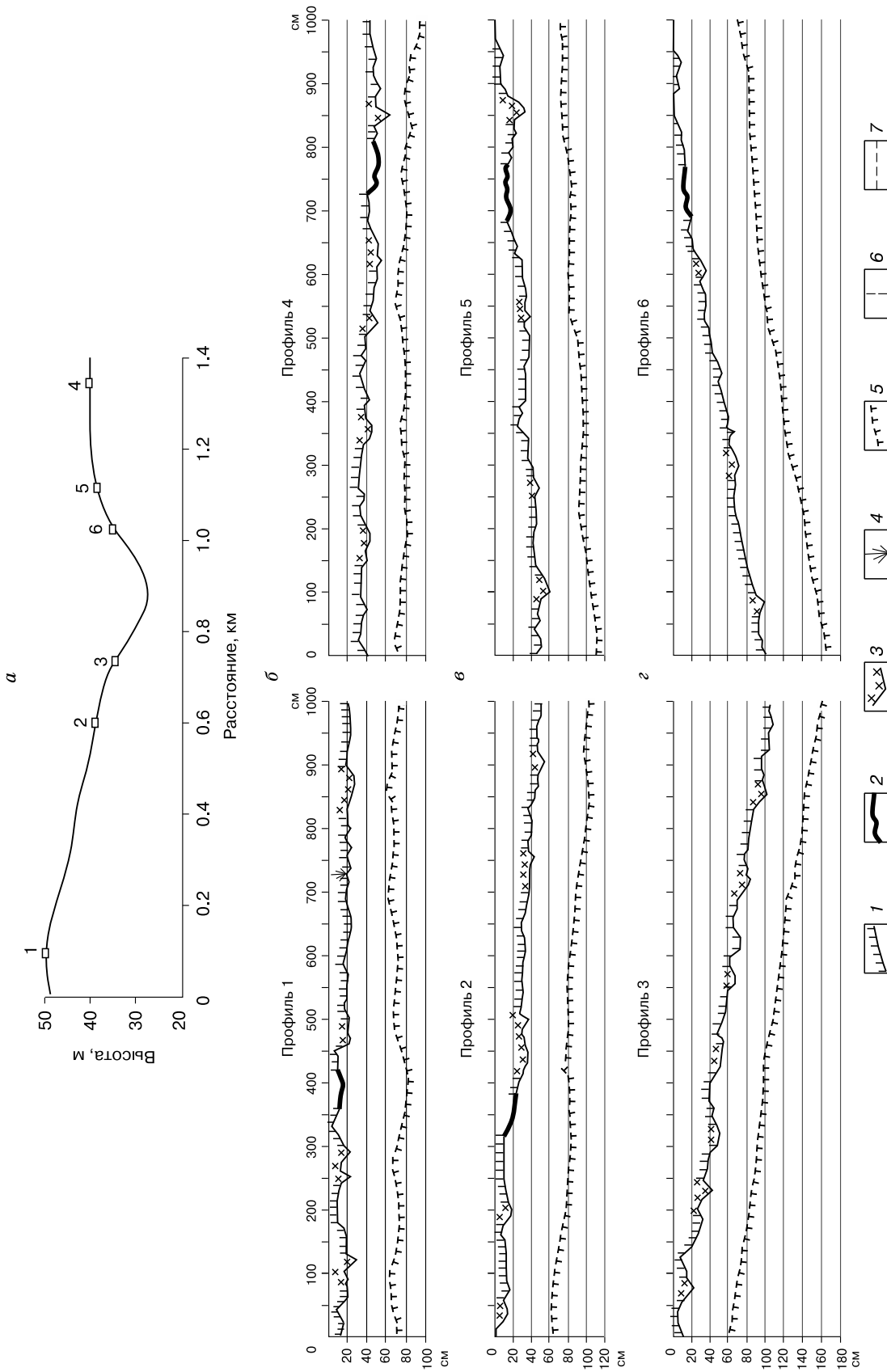


Рис. 2. Ключевой участок "Аллаиха".

Строение микрорельефа дневной поверхности и поверхности ММП: *а* – схема расположения профилей (1–6) микрорельефа в мезорельефе (слева – дренированный едомный суглинистый водораздел; справа – заболоченный едомный суглинистый водораздел); *б* – водораздел; *в* – пологий склон (уклон до 3–5°); *г* – крутой склон (уклон более 3–5°).

Здесь и на рис. 3–5 и 8 – шаг измерений 10 см, длина и глубина указаны в сантиметрах. 1 – полигон; 2 – свежее пятно излившегося грунта; 3 – межполитональная трещина; 4 – органигенный осокново-злаковый буторок; 5 – поверхность ММП; 6 – условная граница между отдельными частями СТС под различными элементами микрорельефа дневной поверхности; 7 – уровень исходной поверхности.

достижению деятельным слоем своей максимальной мощности (конец августа–середина сентября). Исследования преимущественно выполнялись на водоразделах и пологих (до 3–4°) склонах. В этих условиях взаимоотношение микрорельефа дневной поверхности и поверхности ММП является наиболее выраженным, практически отсутствует влияние экспозиции (рис. 2, *a–в*). При переходе к склонам большей (5° и более) крутизны микрорельеф поверхности ММП сглаживается под действием гравитационных сил, солифлюкции, отепляющего действия надмерзлотной верховодки (см. рис. 2, *г*).

Микронивелирование дневной поверхности и поверхности ММП проводилось на различных элементах мезорельефа с точностью 1 см от выверенной в горизонтальном отношении, условно нулевой поверхности. Линейные и площадные измерения выполнялись с шагом 10 см, в каждой точке измерений фиксировался элемент микрорельефа. В отдельных случаях, в пределах измеряемых площадок и профилей закладывались разрезы, где осуществлялось измерение мощностей генетических горизонтов почв, оценивались качественный состав и криогенное строение верхнего (переходного) слоя. Среднеголетняя мощность СТС в таблице приведена по данным интерактивной базы CALM (<http://www.gwu.edu/~calm/>).

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СТРОЕНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ММП

Полевые исследования, выполненные на ключевых участках, находящихся в различных физико-географических условиях, и анализ литературных данных позволили установить ряд ведущих факторов, обуславливающих организацию строения и степень выраженности микрорельефа поверхности ММП, – расчлененность, перепады высот (в том числе по отношению к мощности СТС), углы падения склонов и т. д.

Зональность почвенно-растительного покрова. Авторами установлено, что пространственная выраженность микрорельефа ММП в Северном полушарии преимущественно снижается к югу. Этот факт обусловлен ростом мощности СТС и нивелирующим эффектом растительного покрова и верхних органогенных почвенных горизонтов (подстилочного, торфянистого, перегнойного и т. п.), мощность и сомкнутость которых закономерно увеличиваются в том же направлении.

Пространственная неоднородность растительного покрова и органогенных горизонтов почв оказывает значительное влияние на характер микрорельефа поверхности ММП. В зоне полярных пустынь и арктической тундры фрагментарный органогенный горизонт формируется лишь по бордюрам и трещинам криогенных полигональных образований. В силу своей малой мощности и

несплошного покрытия поверхности он не способен оказывать значительного влияния на перераспределение теплового потока внутри толщи СТС [Лавлов, 1979]. Таким образом, формирование микрорельефа поверхности ММП здесь целиком зависит от степени литологической однородности СТС.

В тундровой зоне органогенный горизонт почв приобретает практически сплошное распространение (за исключением случаев пятнообразования, солифлюкционных и термокарстовых нарушений поверхности почвы). Но в пространственном отношении мощность его крайне неравномерна – от 0 см на лишенных растительности пятнах, 2–5 см в центральных частях зарастающих и заросших полигонов, до 20–40 см и более в межполигональных трещинах. В отдельных случаях мощность органогенного горизонта межполигональных трещин может превышать мощность современного деятельного слоя, торфянистый материал проникает непосредственно в верхние слои ММП. Такая пространственная неоднородность почвенно-растительного покрова ведет к формированию ярко выраженного, динамичного в течение сезона оттаивания микрорельефа поверхности ММП (рис. 3).

В лесотундре и северной тайге пятнообразование и излияние грунта происходят крайне редко, увеличивается мощность органогенного поверхностного горизонта, нивелирующего различия между элементами микрорельефа поверхности. Вместе с этим растет глубина СТС, и в результате микрорельеф поверхности ММП практически полностью повторяет рельеф дневной поверхности, за исключением незначительных осложнений, вызванных пространственными различиями в криогенном строении и составе переходного слоя (рис. 4).

Литологический и гранулометрический состав отложений СТС. Характер отложений напрямую определяет их температурный и водный режим, динамику СТС, характер и интенсивность протекающих процессов криогенного массообмена. Аналогично различается и картина строения микрорельефа поверхности мерзлоты на ММП разного состава.

В случае, когда СТС целиком находится в пределах органогенной толщи (аласные котловины, плоскобугристые торфяники и т. п.), микрорельеф поверхности ММП практически полностью наследует микрорельеф дневной поверхности (рис. 5, *a*). Данную зависимость определяет однородность теплофизических свойств толщи торфа, слабо изменяющихся в площадном отношении.

В случае выхода СТС за пределы мощности органогенных отложений (при пересечении межбугровых понижений, повышенном обводнении,

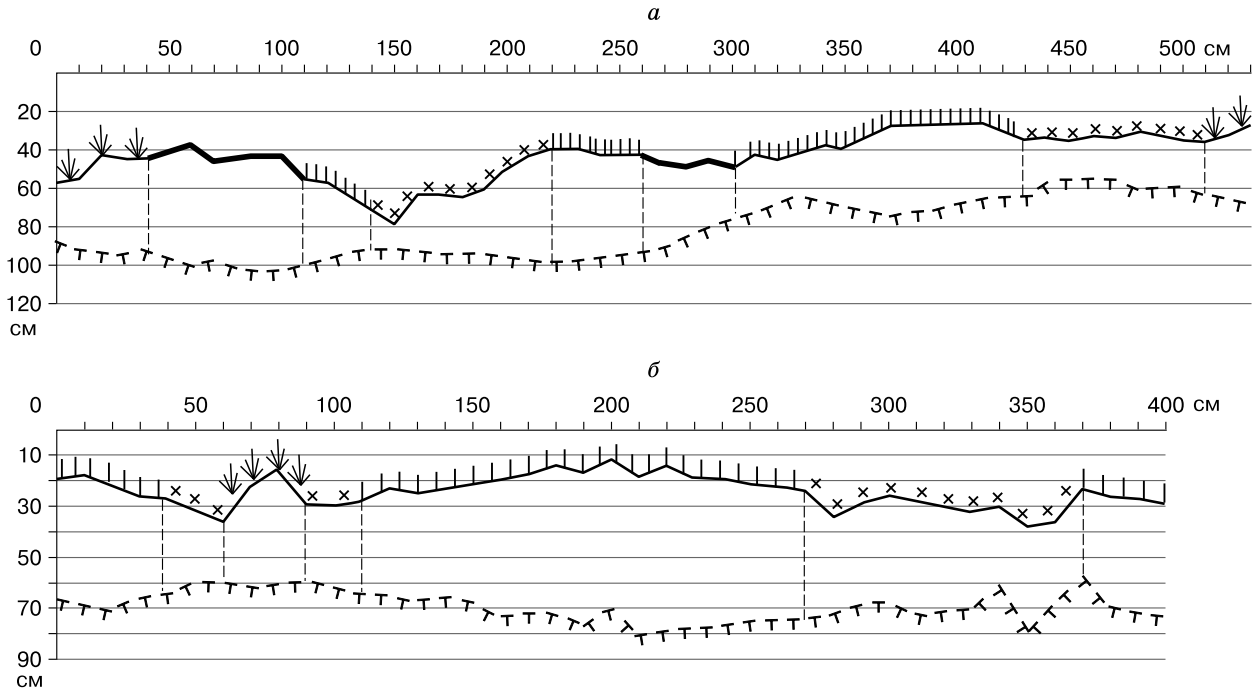


Рис. 3. Ключевые участки “Курьишка” (а) и “Аллаиха” (б).

Строение микрорельефа дневной поверхности и поверхности кровли ММП в тундровой зоне см. усл. обозн. к рис. 2.

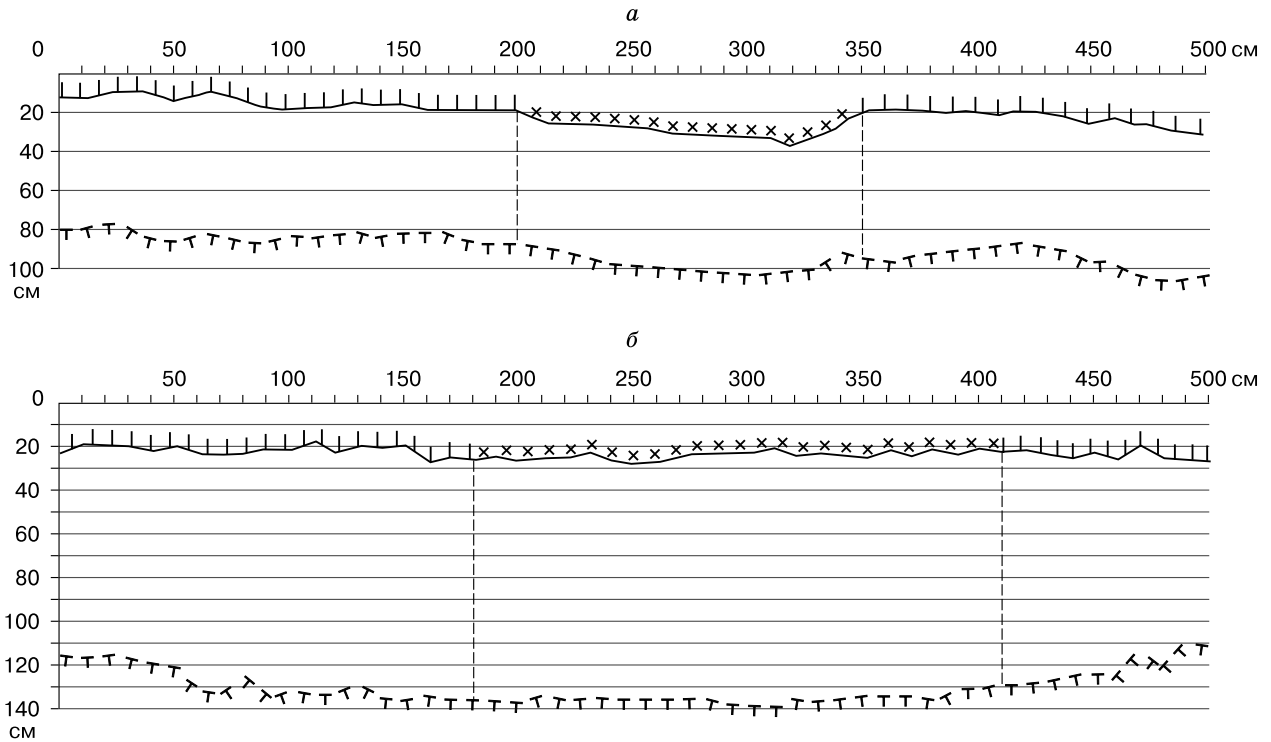


Рис. 4. Ключевые участки “Аяч-Яха” (а) и “Комарок” (б).

Строение микрорельефа дневной поверхности и поверхности кровли ММП в зонах лесотундры и северной тайги см. усл. обозн. к рис. 2.

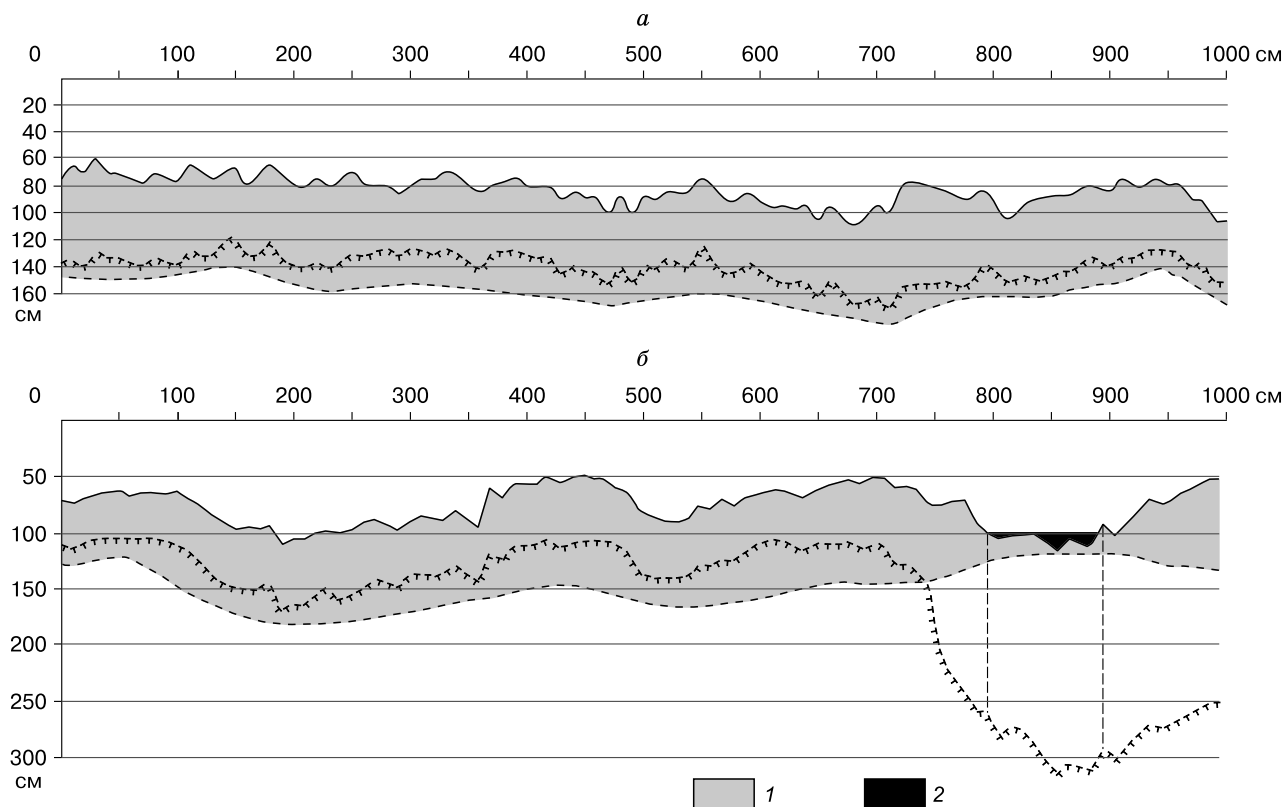


Рис. 5. Ключевой участок “Надым”.

Строение микрорельефа дневной поверхности и поверхности ММП на торфяных буграх (а) и в межбугровой мочажине (б). (Нижняя граница органогенных отложений рассчитана по осредненным данным бурения).

1 – органогенные отложения; 2 – вода.

Ост. усл. обозн. см. на рис. 2.

при деградации торфяных бугров, антропогенном воздействии и т. п.) и проникновения в подстилающую минеральную толщу характер микрорельефа поверхности ММП значительно изменяется.

Если маломощные или деградирующие торфяники подстилаются легкими породами и мощность деятельного слоя превышает мощность торфа, глубина СТС на некоторых участках может катастрофически возрастать – более чем на 1 м на 30 см протяженности профиля (см. рис. 5, б). Причиной этого являются тепляющее воздействие поверхностных водотоков в межбугровых понижениях и крайне высокая теплопроводность водонасыщенных песчаных отложений. При осенне-зимнем промерзании, в отдельных случаях может не происходить слияния сезонномерзлой и многолетнемерзлой толщи, – закладываются скрытые очаги деградации ММП [Мажитова, 2008; Комплексный мониторинг..., 2012].

Сходно с песчаными отложениями, тепляющее влияние влаги в СТС ярко проявляется на ледниково-морских каменисто-песчаных отложениях. Многолетний мониторинг СТС на архипелаге Шпицберген показал, что на участках с раз-

витой криогенной сортировкой перепад высот в рельефе поверхности ММП между элементами микрорельефа дневной поверхности в период интенсивного снеготаяния может достигать 60–80 см, а уклоны поверхности ММП – 40° и более [Repelewska-Pekalowa, Pekala, 2004].

На породах тяжелого гранулометрического состава наблюдается иная картина строения микрорельефа поверхности ММП. В отличие от каменистых и песчаных грунтов суглинистые и глинистые отложения обладают значительно большей влагоудерживающей способностью, что обеспечивает разнообразие качественного и криолитологического строения почв и переходного слоя ММП как в вертикальном, так и в горизонтальном отношении [Конищев, 1965; Шаманова, 1991; Лупачев, Губин, 2008]. Так, в строении переходного слоя ММП, подстилающего почвы нанопolygonальных тундр на севере Якутии (рис. 6, а), выделяются составные элементы: суглинок различной криотекстуры (от тонкошлюровой до атакситовой), мерзлая смесь торфянисто-минерального материала, чистый лед (см. рис. 6, б). Данное разнообразие пространственного строения обу-

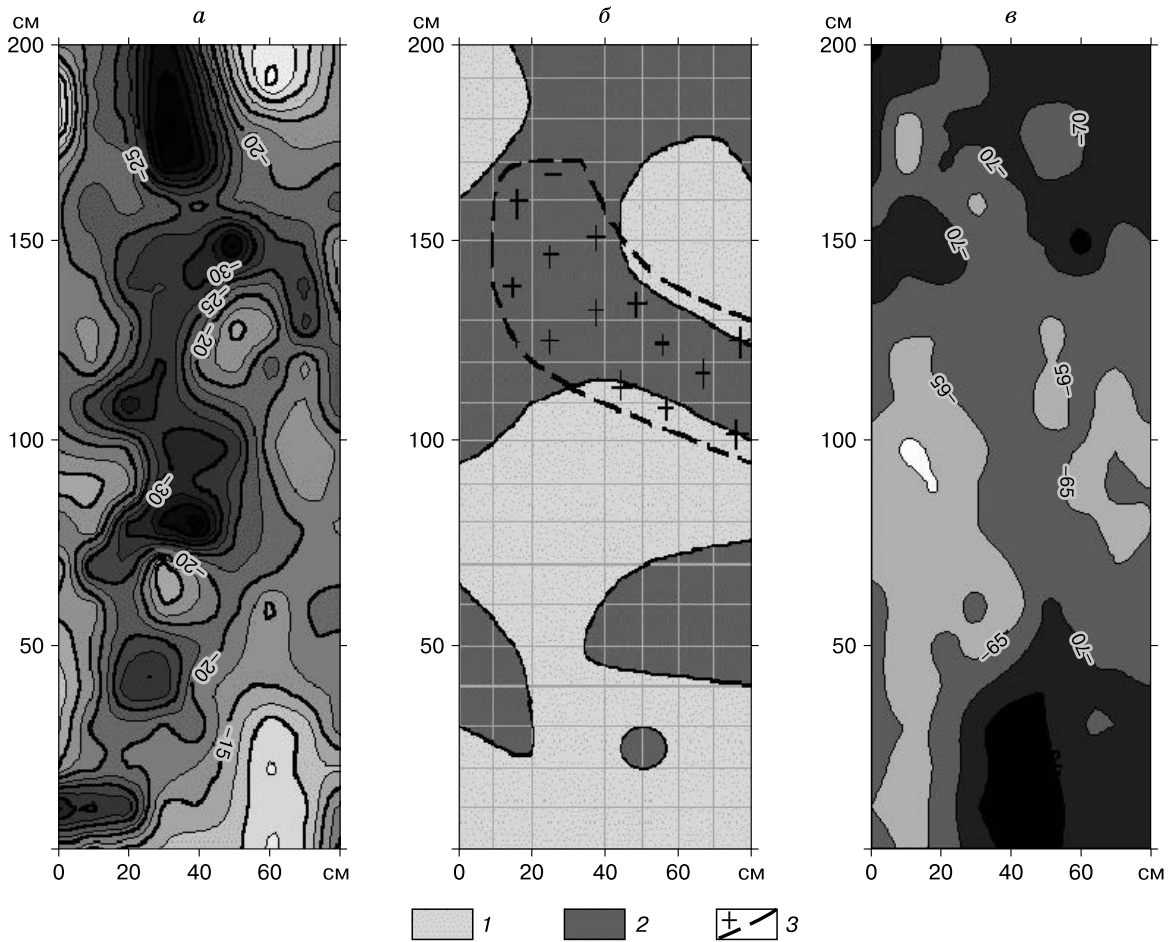


Рис. 6. Ключевой участок “Хомус-Юрях”.

a – строение микрорельефа дневной поверхности; *б* – основные элементы пространственного строения переходного слоя ММП (*б*): 1 – суглинок с сетчатой и тонкошлировой криотекстурой; 2 – органоминеральный материал; 3 – чистый лед, перекрытый тонким (5–10 см) слоем мерзлого органоминерального материала; *в* – строение микрорельефа поверхности ММП. Изолинии проведены через 5 см (*а, в*).

словливает перепады в микрорельефе поверхности ММП в 15–40 см на 50 см протяженности профиля, уклоны поверхности ММП в периоды максимального сезонного оттаивания достигают 15–20° (см. рис. 6, *в*).

Изменение выраженности строения микрорельефа поверхности ММП в период сезона оттаивания. Установлено, что наибольшую выраженность микрорельеф поверхности ММП имеет в первую половину сезона оттаивания, когда ярче всего проявляются различия в теплофизических свойствах материала органогенных горизонтов почв на разных элементах микрорельефа дневной поверхности. Во второй половине лета, когда нижняя граница СТС полностью проникает в минеральную толщу почвенного профиля, микрорельеф поверхности ММП в значительной мере выравнивается и вновь обретает выраженность лишь в самом конце периода оттаивания, когда нижняя

граница достигает переходного слоя ММП, толщина которого имеет пространственно неоднородное криогенное строение и качественный состав.

На породах тяжелого гранулометрического состава сезонный ход развития микрорельефа поверхности ММП проявляется в строении почвенного профиля. В первые годы после пятнообразования (излияния минерального материала на поверхность полигона) наблюдаются наибольшие пространственные различия теплофизических свойств верхних горизонтов криогенных почв [Павлов, 1979]. Участки, лишенные растительного покрова, начинают протаивать раньше и интенсивнее, чем периферийные части нанополлигонов. В микрорельефе поверхности ММП в первой половине летнего сезона под пятном голого грунта формируется чаша, где скапливаются талые воды, устанавливается анаэробный режим, образуется мощное и устойчивое ядро оглеения [Федоров-Да-

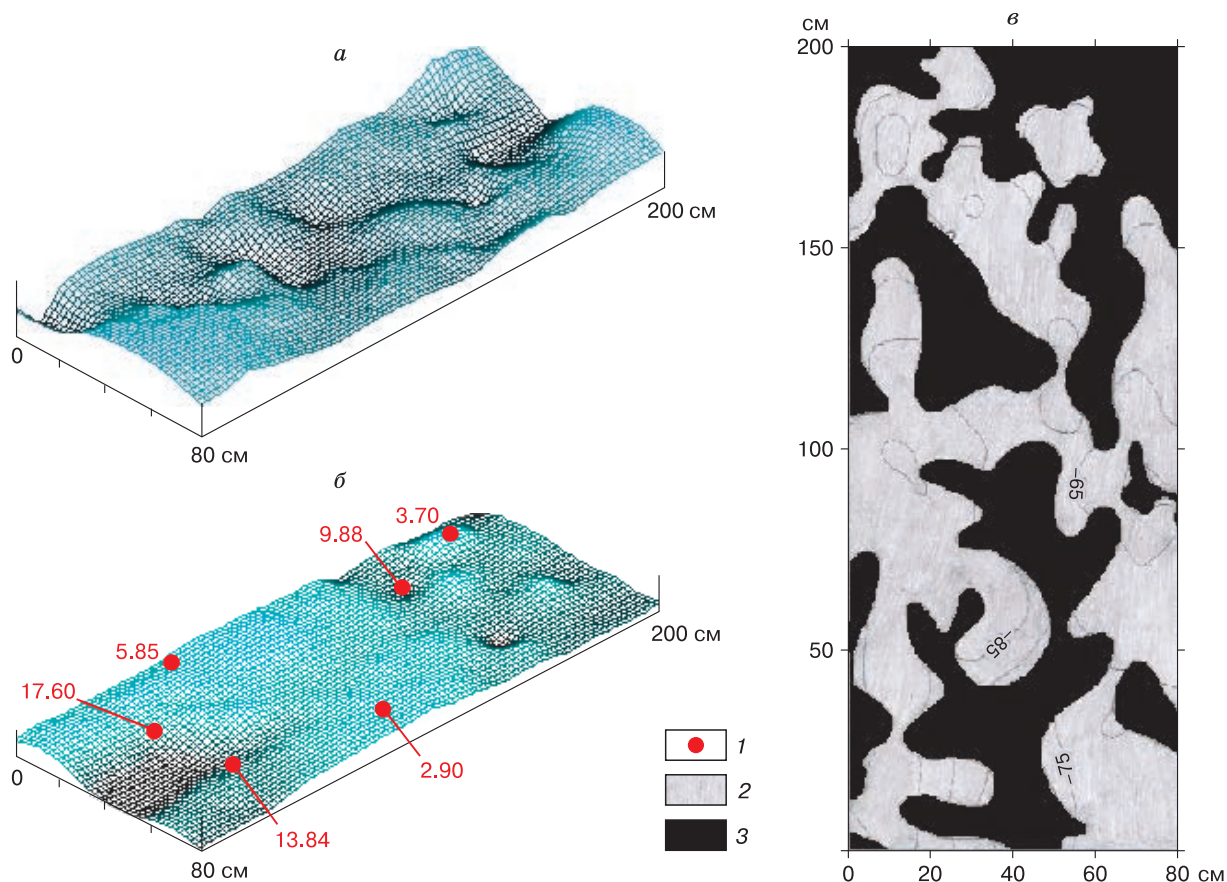


Рис. 7. Ключевой участок “Хомус-Юрях”.

Трехмерная картина строения микрорельефа дневной поверхности (а), поверхности ММП (б); в – зоны денудации и транзита/аккумуляции в микрорельефе поверхности ММП.

1 – содержание $C_{орг}$ %; 2 – зоны денудации; 3 – зоны транзита/аккумуляции.

видов и др., 2004a]. При зарастании пятна микрорельеф поверхности ММП приобретает более выровненный вид, исчезают условия для локального длительного застоя надмерзлотных вод – ядро отлеения теряет интенсивность окраски и значительно сокращается в размере.

Перераспределение вещества и энергии по поверхности ММП. Накопление на поверхности мерзлотного водоупора жизнеспособной почвенной микробиоты [Паринкина, 1989], наличие пиков содержания водорастворимого органического вещества [Караваева, Таргульян, 1960], биофильных элементов [Ostroumov et al., 2001], обменных катионов [Kokelj, Burn, 2005], тонкодисперсных частиц [Наумов, 1974] неоднократно отмечались в литературе. Установлена криоконсервирующая роль ММП при переходе деятельного слоя в многолетнемерзлое состояние [Шатилович и др., 2005; Gilichinsky et al., 1995; Yashina et al., 2012]. Это подтверждает экологическую функцию кровли ММП как геохимического барьера для вертикальной ми-

грации биоты, элементов и соединений. Однако функция латерального перераспределения вещества и энергии по поверхности ММП в течение теплого сезона в криогенных экосистемах практически не исследовалась. А.С. Керженцев [1992] указывал на существование относительно стабильных “внутрипочвенных надмерзлотных водотоков”, осуществляющих сброс влаги и растворенных соединений в ходе летнего оттаивания ММП в Забайкалье. Им же отмечены закономерности динамики изменения и циклического развития мезо- и микрорельефа поверхности ММП.

По мнению авторов, подобное перераспределение в значительной мере может определять пространственное строение микрорельефа поверхности переходного слоя ММП, где формируются ярко выраженные и устойчивые во времени положительные и отрицательные формы рельефа – зоны денудации (выноса растворов, соединений и минерального материала) и транзита/аккумуляции [Степанов, 2006] (рис. 7, в). При сезонном от-

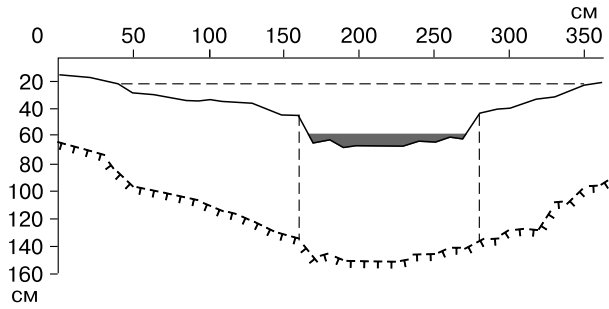


Рис. 8. Ключевой участок “Аяч-Яха”.

Строение микрорельефа дневной поверхности и поверхности кровли ММП при антропогенном нарушении. Усл. обозн. см. на рис. 2 и 5.

таивании, в условиях сильного переувлажнения надмерзлотных горизонтов, вытаивания сильнольдистых криотекстур, значительные перепады высот и углы наклона между элементами микрорельефа поверхности ММП способны резко активизировать процессы перемещения по уклону мерзлоты как почвенных растворов и суспензий, так и более грубого материала, и привести к надмерзлотной миграции и перераспределению в этом слое значительных объемов вещества [Луначев, Губин, 2012]. Авторами установлено, что в пределах отрицательных форм микрорельефа поверхности ММП накапливается и перераспределяется грубодисперсное органическое вещество – содержание его в мерзлом материале может в 3–6 раз превышать аналогичное в материале, слагающем положительные формы (см. рис. 7, б).

В связи с этим вновь актуальным становится вопрос о значительном влиянии иллювиальных процессов при формировании надмерзлотных горизонтов криогенных почв. Авторские данные указывают на возможность латерального перераспределения грубого органического вещества [Там же]. Аналогичным образом внутри профилей и между отдельными элементами почвенного комплекса перераспределяются и более подвижные водорастворимые соединения. Невьясненным остается баланс между количеством вещества и энергии, поступающим к границе ММП в субвертикальном направлении (так называемое “надмерзлотное иллювирувание”) и перераспределяющимся в субгоризонтальном (предположительное “надмерзлотное элювирувание”).

Антропогенное воздействие на строение микрорельефа поверхности ММП и криоконсервация загрязнителей. В работе А.С. Керженцева [1992] описан один из первых опытов по антропогенному управлению строением микрорельефа поверхности ММП. С помощью мелиоративных мероприятий (распашка, мульчирование поверхности соломой и т. п.) удалось за 1–2 года пе-

ренаправить внутрипочвенный и надмерзлотный сток и предотвратить солифлюкционное нарушение грунтовой дороги. Аналогичные изменения в строении микрорельефа поверхности ММП широко распространены при природных или антропогенных нарушениях дневной поверхности (ликвидация почвенно-растительного покрова, вырубки, пожары, прокладка дорог, строительство сооружений, изъятие грунта, солифлюкция, термокарст и т. п.).

На ключевом участке в воркутинской тундре авторами была заложена экспериментальная площадка, где был удален органогенный покров мощностью около 10 см. Спустя два года было произведено микронивелирование дневной поверхности и поверхности ММП. Установлена просадка дневной поверхности 50–60 см, при этом поверхность ММП опустилась на 80–100 см. При снятом 1 м² органогенного покрова влияние нарушения распространилось более чем на 10 м² поверхности ММП (рис. 8).

В литературе имеются сведения о вертикальной миграции нефтепродуктов из СТС в верхние слои ММП и дальнейшем их здесь накоплении. В Канадской Арктике в верхнем метре ММП наблюдалось значимое содержание нефтепродуктов – до 1500–5000 мг/кг (при содержании в СТС – 15 000–20 000 мг/кг) [Biggar et al., 1998]. Подобные исследования проводились также в Большеземельской тундре, где на глубине 50–70 см от поверхности ММП содержание нефтепродуктов было сопоставимым с загрязнением деятельного слоя (600–800 мг/кг) [Чувиллин, Микляева, 2005]. По-видимому, выявленная структура микрорельефа поверхности ММП в значительной мере определяет транзит и аккумуляцию загрязняющих веществ в криогенных экосистемах, подверженных антропогенному воздействию.

ВЫВОДЫ

Выявлено наличие выраженного, устойчивого во времени микрорельефа поверхности ММП. Степень его выраженности зависит от положения в мезорельефе (наибольшая – на выровненных поверхностях водораздельных участков, пологих склонах и в депрессиях, наименьшая – на крутых склонах), мощности СТС и активности процессов криогенного массообмена.

Пространственная однородность литологического состава СТС и почвенно-растительного покрова обуславливает сходство строения микрорельефа дневной поверхности и поверхности ММП.

Ход сезонного оттаивания определяет динамику развития микрорельефа поверхности ММП. Наибольшую выраженность микрорельеф поверхности ММП имеет в первую половину летнего се-

зона, когда ярче всего проявляются различия в теплофизических свойствах материала органогенных горизонтов почв. Во второй половине лета микрорельеф поверхности ММП в значительной мере выравнивается и вновь обретает выраженность лишь в самом конце периода оттаивания, когда нижняя граница достигает пространственно неоднородного переходного слоя ММП.

Микрорельеф поверхности ММП определяет латеральное перераспределение вещества и энергии внутри и между криогенными экосистемами. В строении микрорельефа поверхности ММП установлено наличие стабильных зон аккумуляции, транзита и денудации вещества и энергии.

В местообитаниях, где мерзлые породы находятся на климатическом пределе своего существования (несливающаяся мерзлота, островное пространство и т. п.), микрорельеф поверхности ММП способен провоцировать их деградацию.

Антропогенное воздействие на поверхность почвы отражается в изменении строения микрорельефа поверхности ММП и ведет к перераспределению внутрипочвенного и грунтового надмерзлотного стока, изменению зон накопления и дальнейшей криоконсервации (при последующем промерзании) или выносу вещества и энергии в подчиненные ландшафты (при развитии термокарста).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 14-14-01115); РФФИ (проекты 14-05-31368 мол_а, 14-05-31111 мол_а, 15-04-03960а); гранта Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-3929.2014.5) и междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 144.

Литература

- Вадюнина А.Ф., Худяков О.И.** Распределение тундровых почв по элементам рельефа и их физические характеристики // Мерзлота и почва. Вып. III. Генезис, география и классификация мерзлотных почв. Якутск, Кн. изд-во, 1974, с. 79–94.
- Васильевская В.Д., Караваева Н.А., Наумов Е.М.** Формирование структуры почвенного покрова полярных областей // Почвоведение, 1993, № 7, с. 44–55.
- Горячкин С.В.** Структура, генезис и эволюция почвенного покрова бореально-арктических областей ЕТР: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2006, 48 с.
- Заболотник С.И., Климовский И.В.** Сезонное протаивание и промерзание грунтов в Чарской котловине // Геокриологические условия Забайкальского Севера. М., Наука, 1966, с. 162–172.
- Иванова Е.Н.** Некоторые закономерности строения почвенного покрова в тундре и лесотундре побережья Обской губы // О почвах Урала, Западной и Центральной Сибири. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 49–116.
- Казанцева Л.А.** Пространственная изменчивость ландшафтных и геокриологических условий естественных и нарушенных экосистем северной тайги Западной Сибири // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 14–18.
- Караваева Н.А., Таргульян В.О.** Об особенностях распределения гумуса в тундровых почвах Северной Якутии // Почвоведение, 1960, № 12, с. 36–45.
- Керженцев А.С.** Изменчивость почвы в пространстве и во времени / А.С. Керженцев. М., Наука, 1992, 110 с.
- Комплексный мониторинг северотаежных геосистем Западной Сибири /** Под ред. В.П. Мельникова. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2012, 207 с.
- Кондратьева К.А., Труш Н.И.** К вопросу об определении глубин сезонного промерзания и протаивания грунтов // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1961, вып. II, с. 59–70.
- Конищев В.Н.** Особенности льдовыделения в сезонно-мерзлом слое и морфология покровных лессовидных образований Воркутского района // Подземный лед / Под ред. А.И. Попова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1965, с. 172–182.
- Ливеровский Ю.А.** Почвы тундр Северного края. Л., Изд-во АН СССР, 1934, 112 с. (Тр. Полярной комиссии; Вып. 19).
- Луначев А.В., Губин С.В.** Роль почвообразования в формировании переходного слоя многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 75–83.
- Луначев А.В., Губин С.В.** Органогенные надмерзлотно-аккумулятивные горизонты криоземов тундр севера Якутии // Почвоведение, 2012, № 1, с. 1–12.
- Мажитова Г.Г.** Температурные режимы почв в зоне сплошной многолетней мерзлоты европейского Северо-Востока России // Почвоведение, 2008, № 1, с. 54–67.
- Мажитова Г.Г., Каверин Д.А.** Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // Криосфера Земли, 2007, т. IX, № 4, с. 20–30.
- Мелентьев В.С.** Мелкобугристые полигональные формы рельефа и их влияние на температурный режим пород слоя сезонного протаивания // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1968, вып. VIII, с. 75–80.
- Наумов Е.М.** Криоаридные почвы северного полюса холода // Мерзлота и почва. Вып. III. Генезис, география и классификация мерзлотных почв. Якутск, Кн. изд-во, 1974, с. 104–110.
- Основы геокриологии /** Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1995, ч. 1, 368 с.
- Павлов А.В.** Теплофизика ландшафтов / А.В. Павлов. М., Наука, 1979, 283 с.
- Паринкина О.М.** Микрофлора тундровых почв / О.М. Паринкина. Л., Наука, 1989, 179 с.
- Пукемо М.Н.** Криогенные процессы и связанные с ними формы рельефа о. Западный Шпицберген // Криогенные процессы / Под ред. А.И. Попова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, с. 129–141.
- Романовский Н.Н.** Формирование полигонально-жилных структур / Н.Н. Романовский. Новосибирск, Наука, 1977, 215 с.
- Степанов И.Н.** Теория пластики рельефа и новые тематические карты / И.Н. Степанов. М., Наука, 2006, 203 с.
- Суходровский В.Л.** Экзогенное рельефообразование в криолитозоне / В.Л. Суходровский. М., Наука, 1979, 280 с.
- Федоров-Давыдов Д.Г., Губин С.В., Макеев О.В.** Содержание подвижного железа и возможность оглеения в почвах Колымской низменности // Почвоведение, 2004а, № 2, с. 158–170.
- Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдов С.П., Давыдова А.И. и др.** Пространственно-временные закономерности сезонного протаивания почв на севере Колымской низменности // Криосфера Земли, 2004б, т. VIII, № 4, с. 15–26.

- Харрис С.А.** Многослойность деятельного слоя в районах распространения высокотемпературных многолетнемерзлых пород Канады // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 4, с. 3–12.
- Худяков О.И.** Криогенез и почвообразование / О.И. Худяков. Пушино, ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1983, 196 с.
- Чувиллин Е.М., Микляева Е.С.** Полевой эксперимент по оценке нефтяного загрязнения верхних горизонтов многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 2, с. 60–66.
- Шаманова И.И.** Современный термокарст на приморских низменностях Якутии и Чукотки // Мерзлые породы и криогенные процессы: Сб. науч. тр. / Под ред. Г.И. Дубикова. М., Наука, 1991, с. 102–107.
- Шарапова Т.А.** Динамика криогенного строения пятен-медальонов // Криогенные процессы / Под ред. А.И. Попова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, с. 153–158.
- Шатилов А.В., Шмакова Л.А., Гудков А.В. и др.** Жизнеспособные *Protozoa* из вечномерзлых отложений и погребенных почв // Докл. РАН, 2005, т. 401, № 5, с. 715–717.
- Шполянская Н.А.** Вечная мерзлота Забайкалья / Н.А. Шполянская. М., Наука, 1978, 132 с.
- Шур Ю.Л.** Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст / Ю.Л. Шур. Новосибирск, Наука, 1988, 212 с.
- Эпштейн Г.М.** Некоторые закономерности сезонного промерзания и протаивания грунтов в области островного распространения многолетнемерзлых пород (на примере долины верхнего Амура) // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1961, вып. II, с. 45–58.
- Biggar K.W., Nahir M., Haidar S.** Migration of petroleum contaminants into permafrost // Proc. of the 7th Intern. Conf. "Permafrost" (Yellowknife, June 23–27, 1998). Coll. Nordicana No. 55, Canada, Yellowknife, 1998, p. 43–49.
- Bockheim J.G., Hinkel K.M.** Characteristics and Significance of the Transition Zone in Drained Thaw-Lake Basins of the Arctic Coastal Plain, Alaska // Arctic, 2005, vol. 58, No. 4, p. 406–417.
- Brown J., Ferrians O.J. (Jr.), Heginbottom J.A., Melnikov E.S. (eds.)** Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions // Washington, DC: U.S. Geol. Surv. in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10 000 000, 1997, 1 sheet.
- Buteau S., Fortier R., Allard M.** Rate-controlled cone penetration tests in permafrost // Can. Geotech. J., 2005, vol. 42, p. 184–197.
- Fedorov-Davydov D.G., Sorokovikov V.A., Ostroumov V.E. et al.** Spatial and temporal observations of seasonal thaw in the northern Kolyma Lowland // Polar Geography, 2004, vol. 28, No. 4, p. 308–325.
- Gilichinsky D., Wagener S., Vishnivetskaya T.** Permafrost Microbiology // Permafrost and Periglacial Processes, 1995, vol. 6, p. 281–291.
- Harris S.A.** Nonsorted circles on Plateau Mountain, S.W. Alberta, Canada // Proc. of the 7th Intern. Conf. "Permafrost" (Yellowknife, June 23–27, 1998). Coll. Nordicana No. 55, Canada, Yellowknife, 1998, p. 441–448.
- Hinkel K.M., Nelson F.E.** Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in Northern Alaska, 1995–2000 // J. Geophys. Res., 2003, vol. 108, No. 102 (D2), p. 8168.
- Kokelj S.V., Burn C.R.** Geochemistry of the active layer and near surface permafrost, Mackenzie delta region, Northwest Territories, Canada // Can. J. Earth Sci., 2005, vol. 42, p. 37–48.
- Kokelj S.V., Burn C.R., Tarnocai C.** The structure and dynamics of Earth Hummocks in the Subarctic Forest near Inuvik, Northwest Territories, Canada // Arctic, Antarctic and Alpine Res., 2007, vol. 39, iss. 1, p. 99–109.
- Lewkowicz A.G., Clarke S.** Late-summer solifluction and active layer depths, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, Canada // Proc. of the 7th Intern. Conf. "Permafrost" (Yellowknife, June 23–27, 1998). Coll. Nordicana No. 55, Canada, Yellowknife, 1998, p. 641–646.
- Mazhitova G., Malkova G., Chestnykh O. et al.** Active layer spatial and temporal variability at European Russian Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites // Permafrost and Periglacial Processes, 2004, vol. 15, p. 123–139.
- Ostroumov V., Hoover R., Ostroumova N. et al.** Redistribution of soluble components during ice segregation in freezing ground // Cold Region Sci. and Technol., 2001, vol. 32, p. 175–182.
- Ostroumov V., Siebert Ch., Alekseev A. et al.** Permafrost as a frozen geochemical barrier // Proc. of the 7th Intern. Conf. "Permafrost" (Yellowknife, June 23–27, 1998). Coll. Nordicana No. 55, Canada, Yellowknife, 1998, p. 855–859.
- Repelewska-Pekalowa J., Pekala K.** Active-layer dynamics at the Calypsostranda CALM site, Recherche Fiord region, Spitsbergen // Polar Geography, 2004, vol. 28, No. 4, p. 326–340.
- Shur Y.M., Hinkel K.M., Nelson F.E.** The transient layer: implications for geocryology and climate change science // Permafrost and Periglacial Processes, 2005, vol. 16, p. 5–17.
- Yashina S., Gubin S., Maksimovich S. et al.** Regeneration of whole fertile plants from 30,000-y-old fruit tissue buried in Siberian permafrost // Proc. of the National Academy of Sciences. February 21, 2012, doi: 10.1073/pnas.1118386109.
- Zamolodchikov D.G., Kotov A.N., Karelin D.V. et al.** Active layer monitoring in Northeast Russia: spatial, seasonal and interannual variability // Polar Geography, 2004, vol. 28, No. 4, p. 286–307.

Поступила в редакцию
10 марта 2015 г.