

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 581.526:502.7(571.1)

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОРОД И РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ПОД ВЛИЯНИЕМ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА И ТЕХНОГЕНЕЗА
В НАДЫМСКОМ РАЙОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Н.Г. Москаленко

*Институт криосферы Земли СО РАН,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, nat-moskalenko@mail.ru*

Приведены результаты изучения изменения температуры многолетнемерзлых пород и растительности Надымского района за 1970–2008 гг. в условиях меняющегося климата и техногенеза. Для плоскобугристого торфяника выделены микроассоциации, которые индицируют мощность сезонноталого слоя пород. Прослежено влияние температуры воздуха и количества осадков на встречаемость доминантных видов растений торфяника. Рассмотрено восстановление растительности за 39 лет, сопровождающееся изменением геоэкологических условий, для участков плоскобугристого торфяника с импульсным техногенным нарушением. Под влиянием повышения температуры воздуха (на 0,04 °С в год) отмечено увеличение мощности сезонноталого слоя, повышение температуры пород, появление на торфяниках единичных экземпляров березы, сосны и кедра, увеличение высоты и встречаемости кустарников и покрытия ими поверхности почвы.

Многолетнемерзлые породы, Западная Сибирь, глубина сезонного протаивания, температура многолетнемерзлых пород, растительность, ландшафт, климат, техногенез

PERMAFROST AND VEGETATION CHANGES IN THE NADYM REGION
OF WEST SIBERIAN NORTHERN TAIGA DUE
TO THE CLIMATE CHANGE AND TECHNOGENESIS

N.G. Moskalenko

*Earth Cryosphere Institute SB RAS,
625026, Tyumen, Malygin str., 86, Russia, nat-moskalenko@mail.ru*

This paper presents results of study of permafrost and vegetation changes in Nadym area for 1970–2008 under varying climate and human-induced disturbances. Plant communities – indicators of active layer thickness – are revealed for flat peatland. Interactions between the indicator plants and the air temperature and the amount of precipitation are monitored. Vegetation recovery during 39 years, accompanied by permafrost changes, is investigated for flat peatland sites with pulse human-induced disturbances. The increase in active layer thickness, rise in soil and ground temperature, appearance of single birch, pine (*Pinus silvestris*, *P. sibirica*) on peatlands, increase in height, frequency and coverage of shrubs were due to the rise in air temperature (by 0.04 °C a year).

Permafrost, West Siberia, seasonal thaw depth, permafrost temperature, vegetation, landscape, climate, human-induced disturbances

ВВЕДЕНИЕ

Изменения в пространстве и во времени мощности и температуры многолетнемерзлых пород (ММП), процессов протаивания и промерзания в криолитозоне изучались П.И. Колосковым [1925], Б.Н. Гордковым [1932], М.И. Сумгиным [1937], А.В. Павловым [1965, 2008], А.В. Павловым, Г.В. Малковой [2005], А.П. Тыртыковым [1969, 1979, 1980], Л.И. Мельцер [1990], С.П. Арефьевым с соавт. [2000] и другими исследователями. Они

показали, что условия промерзания и протаивания почв меняются в зависимости от смены растительного покрова. Увеличение мощности мохового и лишайникового покрова приводит к уменьшению глубины сезонного протаивания и понижению температуры почв и пород. Основное внимание в этих работах уделялось изучению изменения мощности сезонноталого слоя (СТС), температуры ММП, состава и структуры растительности в ес-

тественных условиях. Взаимосвязи многолетнемерзлых пород и растительности при техногенных нарушениях изучены недостаточно.

В настоящей статье рассматриваются изменения температуры многолетнемерзлых пород, мощности сезонноталого слоя пород, состава и структуры растительности, которые изучались как в естественных условиях, так и на участках, нарушенных линейным строительством. Эти изменения выявлены в результате 39-летних наблюдений за температурой пород, мощностью СТС, составом растительности, высотой, встречаемостью доминантных видов растений и покрытием ими поверхности на постоянных площадках геокриологического мониторинга в полосе трассы магистрального газопровода Надым–Пунга и прилегающих к ней ненарушенных участках.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Надымский стационарный участок расположен в 30 км к юго-востоку от г. Надым [Антропогенные изменения..., 2006] в зоне островного распространения ММП [Ландшафт..., 1983]. Острова многолетнемерзлых пород, занимающие до 50 % площади, приурочены к торфяникам, торфяным болотам и буграм пучения III озерно-аллювиальной равнины с абсолютными отметками 25–30 м. Равнина сложена песчаными отложениями с прослоями суглинков, местами перекрытыми с поверхности торфом.

Геокриологические и геоботанические исследования в Надымском районе начались в 1967 г. В 1971 году, когда началось строительство газопровода Надым–Пунга, были заложены четыре наблюдательные площадки размером 10 × 10 м. С 1972 года, когда газопровод был введен в эксплуатацию, число площадок увеличилось до 10, а с 1975 г. – до 28. Ежегодно на площадках, расположенных в разных природных комплексах в естественных и нарушенных условиях, выполнялось детальное описание растительности. Описывалась вертикальная и горизонтальная структура покрова, определялась обилие, фенологическое и жизненное состояние видов растений, измерялась средняя высота, встречаемость видов и покрытие ими почвы на 50 площадках размером 0,1 м². Рядом с площадками закладывались шурфы для описания почвенных разрезов. Измерялась мощность СТС, температура пород в скважинах глубиной 10 м; до 1983 г. выполнялись микроклиматические наблюдения в летний сезон и ежемесячно измерялась мощность снега в зимний период. В 1997 г. в рамках Международного проекта CALM (циркумполярный мониторинг сезонноталого слоя) на торфянике была заложена площадка 100 × 100 м, на которой ежегодно в 121 точках, закрепленных на местности реперами, измеряется мощность се-

зонноталого слоя и О.Е. Пономаревой проводится нивелирование микрорельефа [Пономарева, Скворцов, 2006]. У всех (121) реперов в 1997 г. закладывались площадки размером 1 × 1 м, на которых выполнялось детальное описание растительности, определялась влажность СТС и производились прикопки Г.В. Матышаком для составления почвенной карты [Богатырев и др., 2004].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение микрофациальной [Москаленко, 1999] структуры растительности и данных по мощности сезонноталого слоя пород на площадке CALM показало, что минимальная мощность СТС (67,1 см) приурочена к плоским участкам торфяника с морошково-багульниково-лишайниково-сфагновым покровом (таблица). Максимальная мощность СТС (173,7 см) приурочена к большим (площадью до 5 м²) мочажинам с осоково-сфагновым покровом.

С конца 70-х гг. XX в. наблюдается повышение летней и зимней температуры воздуха. По данным Надымской метеостанции за 1970–2008 гг., тренд повышения среднегодовой температуры составил 0,04 °С в год (рис. 1, а), а сумм летних температур – 0,3 °С. С повышением температуры воздуха связано устойчивое увеличение (на 20–80 %) мощности сезонноталого слоя пород во всех природных комплексах. В конце XX в., как справедливо отмечает А.В. Павлов [2008], заметного увеличения мощности СТС в торфяниках не наблюдалось, но в первое десятилетие XXI в., когда были очень теплые летние периоды (2005 и 2007 гг. со среднегодовой температурой –2,6 и –2,8 °С), мощность СТС торфа стала больше. Мощность СТС торфа за 39-летний период увеличилась с 50 до 65 см (см. рис. 1, б).

Удаление растительного покрова на трассе газопровода привело к увеличению мощности сезонноталого слоя пород во всех изученных природных комплексах. Однако величина и характер этих изменений во времени в разных ландшафтных условиях существенно различаются. Например, на буграх пучения, сложенных с поверхности песками, подстилаемыми сильнольдистыми суглинка-

Растительность и мощность сезонноталого слоя (*h*) на плоскобугристом торфянике

Растительный покров	<i>h</i> , см	<i>K</i> *
Морошково-багульниково-лишайниково-сфагновый	67,1 ± 17,1	–0,71 (0,5–0,8)
Осоково-сфагновый	173,7 ± 28,2	0,58 (0,5–0,7)

* *K* – коэффициент корреляции (доверительный уровень).

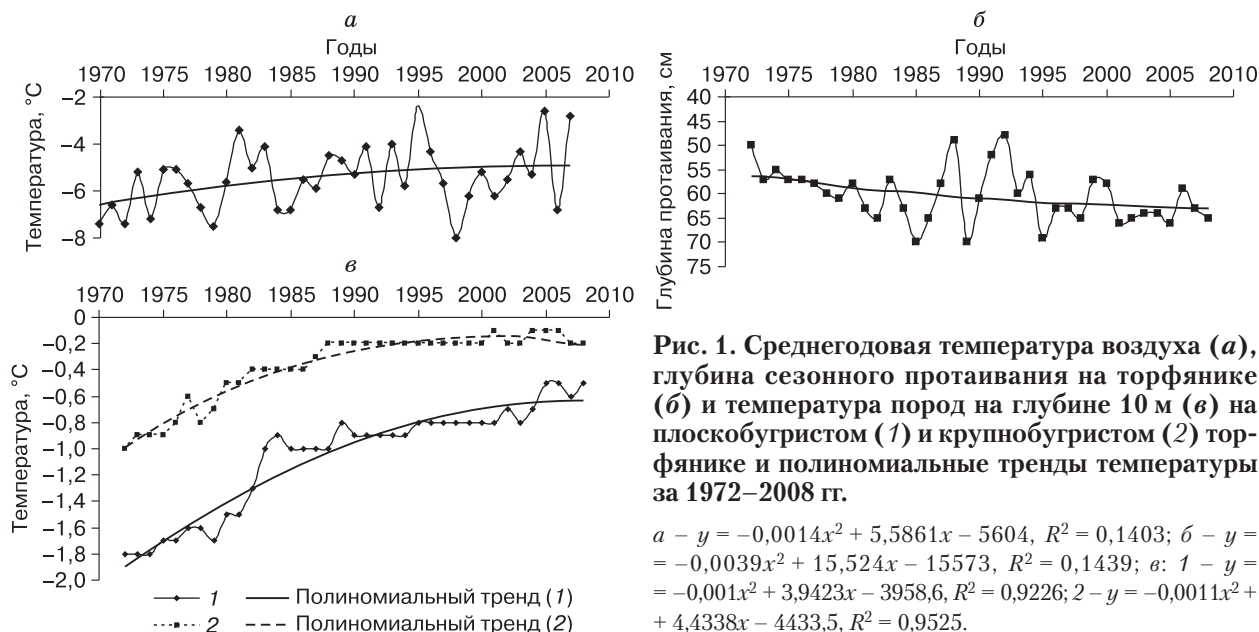


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха (а), глубина сезонного протаивания на торфянике (б) и температура пород на глубине 10 м (в) на плоскобугристом (1) и крупнобугристом (2) торфянике и полиномиальные тренды температуры за 1972–2008 г.

$a - y = -0,0014x^2 + 5,5861x - 5604, R^2 = 0,1403$; $б - y = -0,0039x^2 + 15,524x - 15573, R^2 = 0,1439$; $в: 1 - y = -0,001x^2 + 3,9423x - 3958,6, R^2 = 0,9226$; $2 - y = -0,0011x^2 + 4,4338x - 4433,5, R^2 = 0,9525$.

ми, мощность СТС увеличилась в 2 раза уже на второй год после нарушения (с 110 до 230 см). В последующие годы увеличение глубины сезонного протаивания было небольшим (10 % от средней величины максимальной мощности СТС). В последнее десятилетие отмечалось увеличение максимальной мощности СТС как в нарушенных (до 425 см), так и в естественных условиях (до 190–200 см), обусловленное повышением температуры воздуха.

На плоскобугристом торфянике в первые пять лет после снятия растительного покрова мощность СТС увеличилась незначительно – с 57 до 64 см, т. е. на 13 %. Однако через 11 лет в результате осадки поверхности и развития заболачивания мощность СТС увеличилась до 120 см. Через 18 лет максимальная мощность СТС превысила глубину сезонного промерзания и кровля мерзлой толщи понизилась до 2 м. За весь 39-летний период исследований повышения кровли мерзлой толщи не наблюдалось.

В связи с повышением среднегодовой температуры воздуха на $0,04$ °C в год температура ММП также повысилась. Максимальное повышение температуры пород отмечено на крупнобугристых торфяниках. На этих торфяниках температуры пород на глубине 10 м (подошве слоя с годовыми колебаниями температур) за период исследований повысились на $1,3$ °C (с $-1,8$ до $-0,5$ °C). Тренд возрастания температуры пород составил $0,03$ °C в год (см. рис. 1, в, 2). На плоскобугристом торфянике повышение температуры пород было меньше – всего $0,8$ °C. Температура пород повысилась с $-1,0$ до $-0,2$ °C.

Повышение температуры воздуха и пород, а также увеличение мощности СТС привело к поселению на торфяниках единичных экземпляров деревьев (березы извилистой, кедра и сосны), ранее не характерных для этих природных комплексов. Наблюдения на постоянных закрепленных на местности площадках показали, что за исследованный 39-летний период увеличилась высота и встречаемость кустарников (багульника и карликовой березки) и покрытие ими поверхности почвы.

В 2004 г. в связи с реконструкцией газопровода на большинстве нарушенных площадок, на которых велись наблюдения, вновь сформировавшийся растительный покров был опять удален. Продолжить наблюдения за восстановлением растительного покрова после разового нарушения удалось только на четырех площадках (14-й километр газопровода) с удаленной в 1972 г. растительностью, расположенных на плоскобугристом торфянике в 800 м от трассы газопровода. Результаты наблюдений на этих четырех площадках рассматриваются ниже.

На естественной площадке плоскобугристого торфяника развит морошково-багульниково-сфагново-кладониевый фитоценоз. Через 2 года после снятия растительного покрова на нарушенной площадке сформировалась пушицево-морошковая группировка, покрывавшая всего 20 % поверхности; через 4 года она сменилась пушицево-морошково-политриховой; через 7 лет покрытие поверхности травами и мхами увеличилось до 40 %, через 10 лет – до 60 %, участие морошки уменьшилось и возросла роль пушиц (*Eriophorum scheuchzeri*, *E. vaginatum*). Кустарнички и лишайники появи-

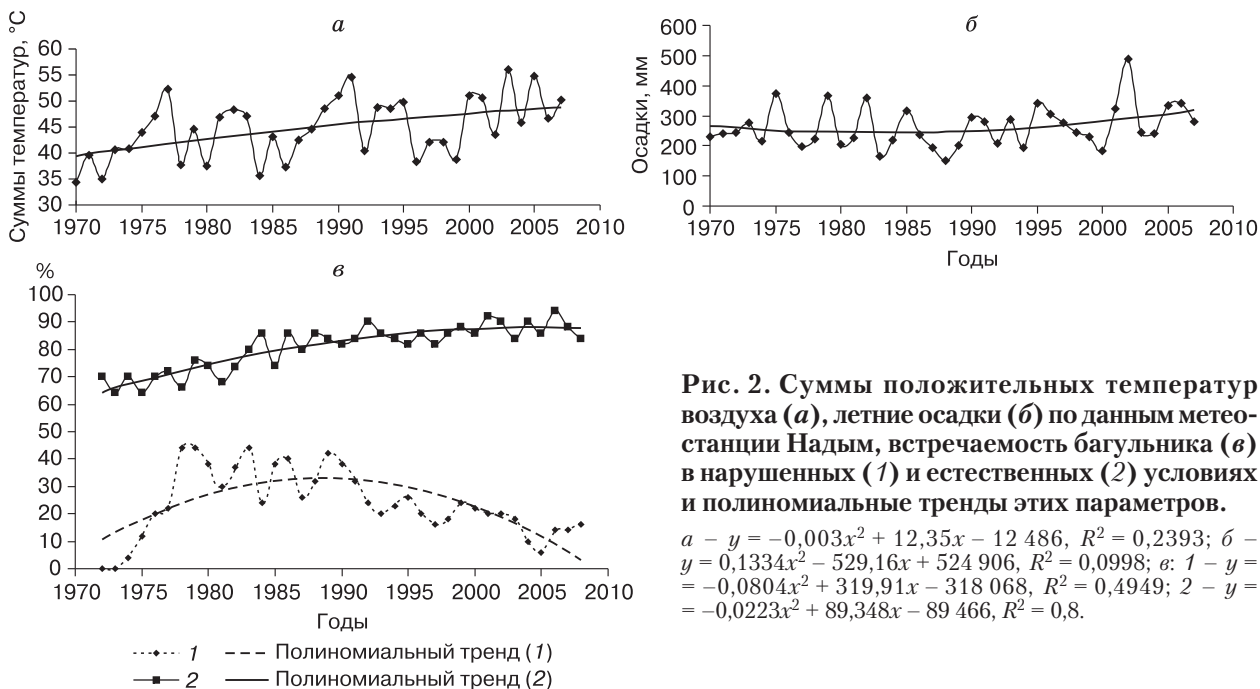


Рис. 2. Суммы положительных температур воздуха (а), летние осадки (б) по данным метеостанции Надым, встречаемость багульника (в) в нарушенных (1) и естественных (2) условиях и полиномиальные тренды этих параметров.

$a - y = -0,003x^2 + 12,35x - 12\,486, R^2 = 0,2393$; $b - y = 0,1334x^2 - 529,16x + 524\,906, R^2 = 0,0998$; $v: 1 - y = -0,0804x^2 + 319,91x - 318\,068, R^2 = 0,4949$; $2 - y = -0,0223x^2 + 89,348x - 89\,466, R^2 = 0,8$.

лись на редких моховых кочках, но их участие в сложении растительного покрова было небольшим. Значительную долю напочвенного покрова наряду с политриховыми мхами стали составлять сфагновые мхи. Через 15 лет на нарушенной площадке был развит сплошной морошково-пушицево-политрихово-сфагновый покров. Через 30 лет в результате продолжавшейся осадки поверхности, понижения кровли ММП до 2 м и более, развития термокарста и заболачивания морошково-пушицево-политрихово-сфагновый покров сменился пушицево-сфагновым покровом, характерным для болотных растительных сообществ.

Сформировавшийся фрагмент пушицево-сфагнового болота сохраняется и через 39 лет после нарушения. Это болотное сообщество коренным образом отличается от исходного тундрового [Тыртиков, 1982] морошково-багульниково-сфагнуво-кладониевого фитоценоза по внешнему облику, структуре, обилию, встречаемости доминантных видов, покрытию ими поверхности и геокриогическим условиям (понижение кровли многолетнемерзлых пород).

Динамика встречаемости одних и тех же видов растений резко различается в морошково-багульниково-сфагнуво-кладониевом и пушицево-сфагновом сообществах. На естественной площадке встречаемость у багульника имеет четко выраженный, статистически значимый тренд к увеличению, обусловленный повышением температуры воздуха (рис. 2, а, в, 2). На нарушенной площадке изменения встречаемости у багульника

носят иной характер. Встречаемость багульника увеличивается в сухие летние периоды с пониженным количеством летних осадков, а затем после 1990 г. уменьшается в связи с некоторым ростом количества летних осадков и развитием заболачивания (см. рис. 2, б, в, 1). В течение всего периода наблюдений встречаемость у багульника на нарушенной площадке значительно ниже, чем в ненарушенных условиях (см. рис. 2, в).

У морошки встречаемость на естественной площадке не имеет ясно выраженного тренда к возрастанию (рис. 3, а), как это наблюдалось у багульника. На нарушенной площадке изменения встречаемости морошки имеют сходный характер с изменениями этого показателя у багульника в последние годы, когда встречаемость морошки значительно уменьшается в связи с повышением количества летних осадков и развитием заболачивания. Однако в первые годы после нарушения встречаемость морошки (в отличие от багульника) в условиях отсутствия конкуренции со стороны других видов растений быстро увеличивалась и почти достигла первоначальных величин.

У пушицы влагилищной встречаемость в естественных и нарушенных условиях имеет четко выраженный положительный тренд (см. рис. 3, б), обусловленный увеличением количества осадков, но в нарушенных условиях в результате развития заболачивания встречаемость пушицы в 2 раза больше, чем в естественных условиях.

У кладонии встречаемость в естественных условиях при увеличении количества летних осад-

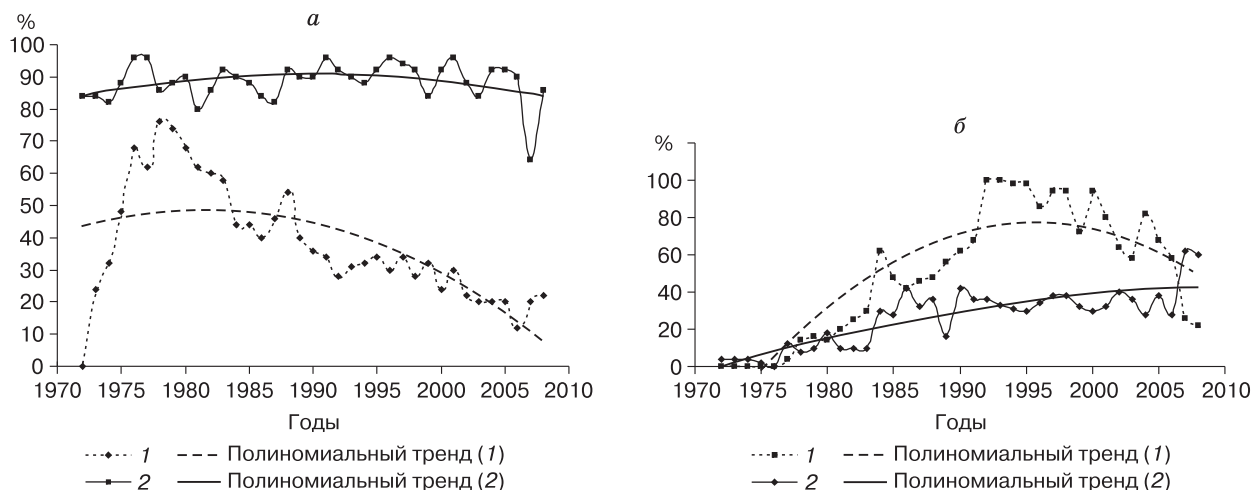


Рис. 3. Встречаемость морозики (*Rubus chamaemorus*) (а) и пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum*) (б) в нарушенных (1) и естественных (2) условиях и полиномиальные тренды встречаемости.

а: 1 - $y = -0,082x^2 + 325,1x - 322\,254$, $R^2 = 0,431$; 2 - $y = -0,0211x^2 + 83,824x - 83\,314$, $R^2 = 0,1309$; б: 1 - $y = -0,0251x^2 + 101,26x - 101\,900$, $R^2 = 0,7088$; 2 - $y = -0,186x^2 + 742,56x - 740\,928$, $R^2 = 0,7813$.

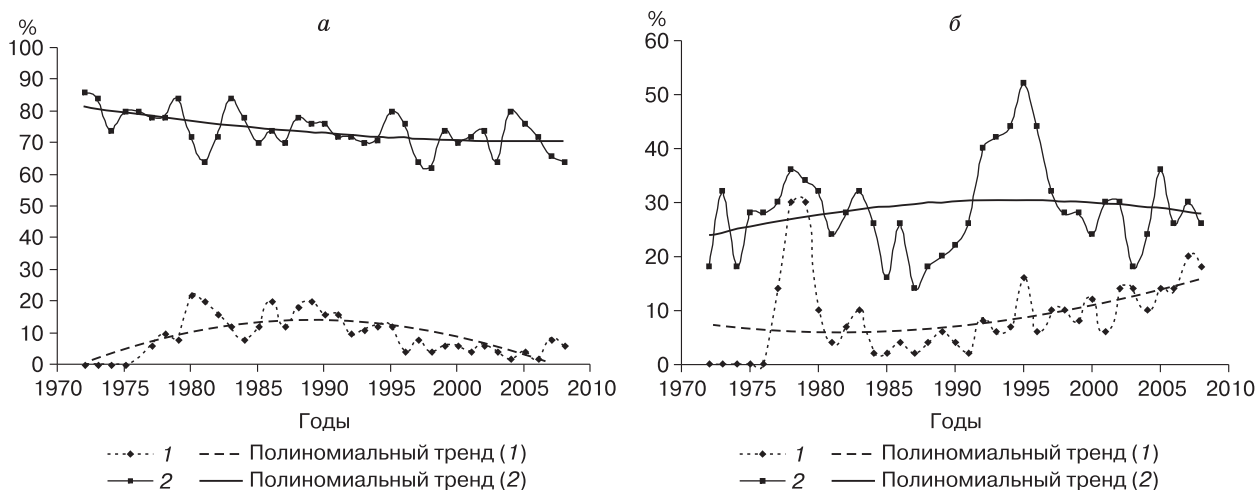


Рис. 4. Встречаемость кладонии (*Cladina stellaris*) (а) и сфагнума (*Sphagnum fuscum*) (б) в нарушенных (1) и естественных (2) условиях и полиномиальные тренды встречаемости.

а: 1 - $y = -0,0425x^2 + 169,11x - 168\,182$, $R^2 = 0,4886$; 2 - $y = 0,0087x^2 - 35,126x + 35\,329$, $R^2 = 0,3114$; б: 1 - $y = 0,0132x^2 - 52,4x + 51\,913$, $R^2 = 0,1471$; 2 - $y = -0,0131x^2 + 52,207x - 52\,029$, $R^2 = 0,047$.

ков имеет слабо выраженный отрицательный тренд (рис. 4, а), ее встречаемость в последние годы немного уменьшилась. Изменение встречаемости кладонии в нарушенных условиях имеет сходный характер с тем, что наблюдался у багульника, а именно встречаемость повышалась до 1990 г., а затем из-за активизации заболачивания в условиях повышенного количества летних осадков она стала уменьшаться и сейчас отличается от встречаемости в естественных условиях в 40 раз.

У сфагнума как в естественных, так и в нарушенных условиях встречаемость немного возрастает (см. рис. 4, б), наблюдается небольшой положительный тренд. Максимумы встречаемости на обоих графиках приходятся на одни и те же годы, достаточно теплые и с большим количеством летних осадков.

ВЫВОДЫ

Многолетнее изучение растительных сообществ и мощности сезонноталого слоя в северной

тайге позволило вычислить коэффициенты корреляции встречаемости микроассоциаций с мощностью СТС, составляющие $-0,71$ для минимальной мощности СТС ($67,1$ см) и $0,58$ для максимальной ($173,7$ см).

С 70-х гг. XX в. отмечено повышение температуры воздуха. По данным Надымской метеостанции за 1970–2008 гг., выявлен тренд к повышению среднегодовой температуры воздуха. Повышение среднегодовой температуры составило $0,04$ °C в год, а суммы летних температур – $0,3$ °C. С повышением температуры воздуха связано устойчивое увеличение мощности СТС во всех природных комплексах. Мощность СТС в торфяниках за 39-летний период возросла с 50 до 65 см (на 30 %). Максимальное увеличение мощности СТС наблюдается на буграх пучения, сложенных с поверхности песками, подстилаемыми сильнольдистыми суглинками. Мощность СТС на таких буграх увеличилась с 110 до 200 см.

Проведенные замеры температуры пород в скважинах показали, что температура пород во всех природных комплексах также повысилась. Максимальное повышение температуры пород на $1,3$ °C отмечено на крупнобугристых торфяниках. На этих торфяниках температура пород на глубине 10 м (подошве слоя с годовыми колебаниями температур) за период исследований повысилась с $-1,8$ до $-0,5$ °C. На плоскобугристом торфянике температура пород повысилась меньше – с $-1,0$ до $-0,2$ °C.

Повышение температуры воздуха и пород и увеличение мощности СТС сопровождалось появлением на торфяниках древесных растений, увеличением высоты, встречаемости кустарников и покрытия ими поверхности почвы.

Исследованы ход восстановления растительного покрова и изменение мощности СТС и температуры пород на нарушенных торфяниках за 1972–2008 гг. После удаления на торфянике морошково-багульниково-сфагново-лишайникового покрова сформировавшийся фрагмент пушицево-сфагнового болота, кровля многолетнемерзлых пород под которым понизилась до 2–3 м, сохраняется и через 39 лет после нарушения.

Работа выполнена в рамках проекта TSP (Thermal State of Permafrost), NSF (National Science Foundation) (ARC-0632400, ARC-0520578) и проекта CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) (грант NSF OPP-9732051, OPP-0225603), при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-01068-а), Губернской Академии и губернатора Тюменской области.

Литература

- Антропогенные** изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Н.Г. Москаленко. М., ИКЗ СО РАН, 2006, 357 с.
- Арефьев С.П., Гашев С.Н., Степанова В.Б. и др.** Природная среда Ямала. Т. 3. Биоценозы Ямала в условиях промышленного освоения. Тюмень, ИПОС СО РАН, 2000, 136 с.
- Богатырев Л.Г., Матьшак Г.В., Демин В.В., Сапожников В.А.** О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок // Лесоведение, 2004, № 4, с. 37–52.
- Городков Б.Н.** Вечная мерзлота в Северном крае // Тр. СОПС, 1932, вып. I, с. 5–109.
- Колосков П.И.** Климатические основы сельского хозяйства Амурской области. Благовещенск, Дальневост. обл. метеорол. бюро, 1925, 152 с.
- Ландшафты** криолитозоны Западно-Сибирской газовой провинции / Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск, Наука, 1983, 185 с.
- Мельцер Л.И.** Устойчивость биогеоценозов Крайнего Севера к техногенному воздействию и отображение ее на картах // Геокриологические исследования в арктических районах: Межд. симпозиум “Человек, криосфера и охрана Арктики”. Тюмень, 1990, с. 39–50.
- Москаленко Н.Г.** Антропогенная динамика растительного покрова равнин криолитозоны. Новосибирск, Наука, 1999, 280 с.
- Павлов А.В.** Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., Наука, 1965, 254 с.
- Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 229 с.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Современные изменения климата на севере России. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2005, 54 с.
- Пономарева О.Е., Скворцов А.Г.** Методы и результаты изучения экзогенных геологических процессов в Надымском районе Западной Сибири // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения: Материалы междунар. конф. Тюмень, ТюмГНГУ, 2006, т. 1, с. 272–274.
- Сумгин М.И.** Вечная мерзлота почв в пределах СССР. 2-е изд. М., Изд-во АН СССР, 1937, 173 с.
- Тыртиков А.П.** Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1969, 192 с.
- Тыртиков А.П.** Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М., Наука, 1979, 115 с.
- Тыртиков А.П.** Влияние растительного покрова на температуру грунтов на севере Западной Сибири // Природные условия Западной Сибири. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, с. 112–118.
- Тыртиков А.П.** Растительность долины и коренных берегов Юрибея в среднем течении (полуостров Ямал) // Науч. докл. высш. шк. Биол. науки, 1982, № 4, с. 62–69.

Поступила в редакцию
30 октября 2008 г.