

Влияние изменения экологических условий на почвенное дыхание (постсолифлюкционные сукцессии)

Евграфова С.Ю. (evgrafova@ksc.krasn.ru), Масягина О.В., Шкикунов В.Г.

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

Введение

Солифлюкция является одним из дестабилизирующих факторов в северных лесных экосистемах. Ее влияние на лесную растительность мерзлотной зоны Сибири может рассматриваться наравне с пожарами и рубками. Солифлюкционные процессы, в отличие от пожаров и сплошных рубок, приводят к полному разрушению исходных экосистем. При этих оползневых явлениях происходит сползание по склонам деятельного слоя почвы вместе с растительностью по мерзлой толще подстилающего грунта. В условиях криолитозоны Приенисейской Сибири обычно встречается быстрая дифференциальная солифлюкция (на склонах средней крутизны 8-15° и более), которая имеет локальный характер и проявляется в виде медленных, быстрых, а иногда и катастрофических сплывов с образованием борозд, рытвин и деллей (Жигарев 1967). Причинами солифлюкции могут быть пожары, переувлажнение сезонно-талого слоя, избыточное количество осадков в теплое время года, либо интенсивное таяние снежного покрова. В долинах водотоков солифлюкция является важным рельефообразующим фактором (Абаимов 1997, Катина 1965, Поздняков 1986). В настоящее время, развитию, последствиям солифлюкционных процессов и закономерностям постсолифлюкционных изменений почвенного и растительного покрова уделяется незначительное внимание.

На месте солифлюкции, особенно на мерзлотных почвах, складываются очень разнородные экологические условия (микроклиматические и эдафические), наблюдается снижение кислотности и содержания биогенных веществ (азота, фосфора, калия, кальция) и углерода, происходит резкое изменение соотношения C:N и особенно на наносном мелкозёме. Все эти факторы дают начало первой фазе для восстановления вновь формирующихся биогеоценозов. В связи с этим, активность микрофлоры почвы, возобновление растительности и почвенное дыхание может сильно варьировать на различных микроучастках (например, в зависимости от микрорельефа).

В данном исследовании мы попытались ответить на вопрос, каким образом изменение экологических условий, вызванное солифлюкционными процессами, влияет на почвенное дыхание и на его микробную составляющую.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования были изучены два солифлюкционных участка разного возраста в долине р. Нижняя Тунгуска, на склонах юго-восточной экспозиции, описанные в (Бугаенко и др., 2005). Один участок был нарушен солифлюкцией в 2001г. (С1, рис. 1), другой – в 1972г. (С2, рис. 2). Площадь повреждения для С1 вместе со шлейфом выноса составляет 11200 м², для С2 - 5700 м² (табл. 1). Оба постсолифлюкционных участка, как правило, характеризовались успешным возобновлением лиственниц Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.).

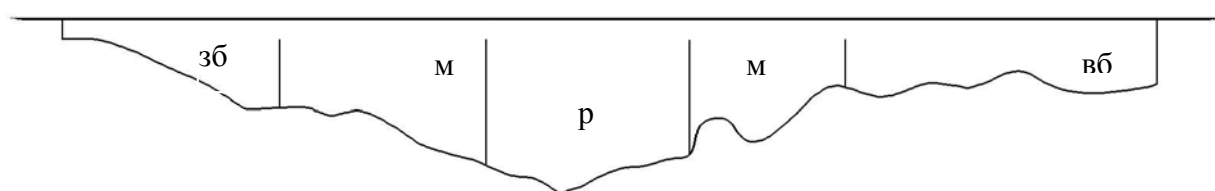


Рис. 1. Поперечный профиль солифлюкционного участка 2001г. (С1) в средней части склона с отмеченными границами микрогруппировок: зб и вб - западная и восточная бровки; м - наносной мелкозём; р – русло ручья.

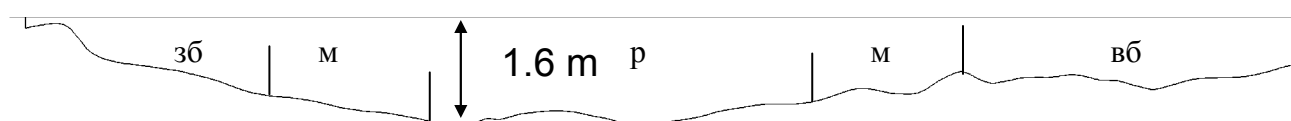


Рис. 2. Поперечный профиль солифлюкционного участка 1972г. (С2) с отмеченными границами микрогруппировок: зб и вб - западная и восточная бровки; м - наносной мелкозём; р – русло ручья.



С1



С2

Рис. 3. Солифлюкционные участки 2001г. (С1) и 1972г. (С2) в 2007г. (фото Масягиной О.В.).

Таблица 1. Характеристика солифлюкционных участков

Параметры	C1	C2
Дата солифлюкции	2001г.	1972г.
Давность (на момент 2007г.), лет	6 лет	35 лет
Крутизна склона, °	19-27	11-20
Длина склона, м	390	290
Максимальная ширина участка, м	33	37
Минимальная ширина участка, м	12	7
Площадь участка, м ²	11200	5700
Объем снесенной почвы, м ³	5365	3725

Внутри одной солифлюкционной площади рассматривалось три микроэкологических участка: почвенно-растительные толщи на границе солифлюкции и неповрежденных участков (западная (зб) и восточная бровка (вб)), а также мелкозем (м), расположенные в средней части склона, где были заложены топо-экологические профили шириной 25 м и длиной во всю ширину солифлюкционного участка (25–30 м) (Бугаенко и др., 2005). Контролем солифлюкций 1972 и 2001г. служили прилегающие к ним коренные (ненарушенные) насаждения.

В средней части склона на солифлюкционных и неповрежденных участках в летнее время (июль 2005-2007гг.) в послеполуденное время (с 13:00 до 18:00) через каждые 3-5 суток температурными датчиками измеряли температуру почвы на глубине 5 см. Влажность почвы на глубине 0-10 см измеряли в июле 2006-2007г.

Почвенное дыхание определяли на микроучастках в 3-5 биологических повторностях в июле 2007 г. при помощи Li-Cor 6200 (LI-COR, USA) в 3-5 кратной повторности на солифлюкциях 2001г. и 1972г. (включая контроли). Одновременно измеряли температуру (T_s) и влажность почвы на глубине 5 см, а также мощность напочвенного покрова (высота живого напочвенного покрова в сумме с высотой подстилки).

Оценка биомассы почвенной гетеротрофной микрофлоры почв проводилась кинетическим методом, для чего определяли субстрат-индуцированное дыхание (СИД) почвенной микрофлоры с последующим пересчетом на углерод микробной биомассы, $C-CO_2$ на основании уравнения $C_{мик} (мг С г почвы^{-1}) = 50.4 \times СИД (мг CO_2-C г почвы^{-1} ч^{-1})$ (Sparling, 1995). Параллельно определялось базальное дыхание (БД) микроорганизмов по скорости выделения CO_2 почвой за 5 суток ее инкубации при 22°C и 60% влажности и рассчитывался коэффициент микробиологической активности qCO_2 при помощи уравнения $БД/С_{мик} = qCO_2 (мкгCO_2-C мг^{-1}С_{мик} ч^{-1})$.

Результаты и обсуждение

Исследование температурного режима почвы солифлюкционных и контрольных к ним участков (на глубине 5 см минерального слоя почвы) в течение трехлетнего периода

показало, что на солифлюкционных участках температура почвы, как правило, выше по сравнению с участками неповрежденного древостоя (рис. 4). Причем, на солифлюкционном участке первой стадии сукцессии (солифлюкция 2001 г.) температура почвы в 2-3 раза выше (на 9-14°C), чем в контроле. Такие значительные различия в первую очередь, связаны с полным отсутствием древесного яруса на всей площади солифлюкции. Между солифлюкцией 1972 г. и контролем различия в температуре почвы меньше (1-2°C), что указывает, вероятно, на завершающую фазу восстановительной сукцессии.

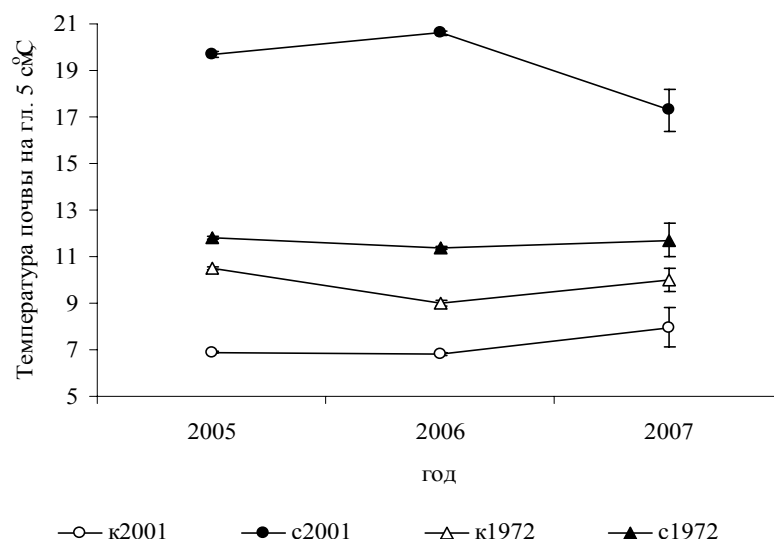


Рис. 4. Среднеиюльская температура почвы на глубине 5 см на солифлюкционном участке 2001 и 1972г. и в контроле

Температуру почвы микроучастков (мелкозем, восточная бровка, западная бровка) регистрировали в июле 2007 г. (табл. 2). Данные показали, что на солифлюкции 2001 г. наибольшая температура почвы наблюдалась на мелкозем, тогда как на солифлюкции 1972 г. температура почвы на всех микроучастках была сходна и сопоставима с контролем.

Таблица 2. Температура почвы на глубине 5 см (°C) на микроучастках в июле 2007г.

Тип микроучастка	Солифлюкция 2001г.	Солифлюкция 1972г.
Мелкозем	19,5	12,1
Восточная бровка	16,2	12,9
Западная бровка	16,1	10,0
Контроль	8,0	10,0

Важным экологическим показателем, влияющим на успешность и специфичность восстановления поврежденного биоценоза, является влажность почвы. Нами было отмечено, что на всех участках солифлюкции величина влажности почвы, как правило, ниже, чем в контроле (рис. 5). Хотя различия недостоверны, из рис. 5 видно, что в контроле влажность почвы в 1.1-1.3 раза выше по сравнению с солифлюкционным участком 2001 г. На более старой солифлюкции различия во влажности почвы с контролем минимальны.

Таким образом, экологические условия солифлюкционных участков резко отличались как между отдельными микроучастками, так и контролем, и зависели от давности прохождения солифлюкции. Сложившиеся экологические условия на солифлюкционных микроучастках неоднозначно повлияли на процессы возобновления вновь формирующегося фитоценоза: с одной стороны, за постсолифлюкционный период произошло медленное восстановление древесных пород (лиственницы и душейки), с другой стороны сформировался живой напочвенный покров, не характерный для коренных лиственничников. Так, при описании контрольного лиственничника было установлено, что в средней части склона доминирует лиственничник багульниково-брусничный зелёномошный с подлеском из *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar. (табл. 3). На солифлюкционном участке 2001 г. при описании растительности через три года после солифлюкции было выделено 4 микрогруппировки растительного покрова (Бугаенко и др., 2005). Видовое разнообразие высших растений в целом по всему солифлюкционному участку 2001 г. было выше разнообразия коренного сообщества: для солифлюкции было отмечено 27 видов сосудистых растений, в то время как на контроле только 18 видов. С видовым составом зелёных мхов и лишайников наблюдалась обратная картина: на солифлюкции их насчитывается 3 вида, а на контроле 8 видов. Сходная тенденция по видовому разнообразию наблюдалась и на солифлюкционном участке 1972 г., но различия с контролем здесь были не такие сильные, особенно в отношении видового состава мхов и лишайников. Так, на солифлюкции 1972г. отмечено 16 видов сосудистых растений, что в 1.5 выше, чем в контроле. Видовой состав зелёных мхов и лишайников на солифлюкции 1972 г. был в 1.5 раза ниже, чем в контроле (табл. 3).

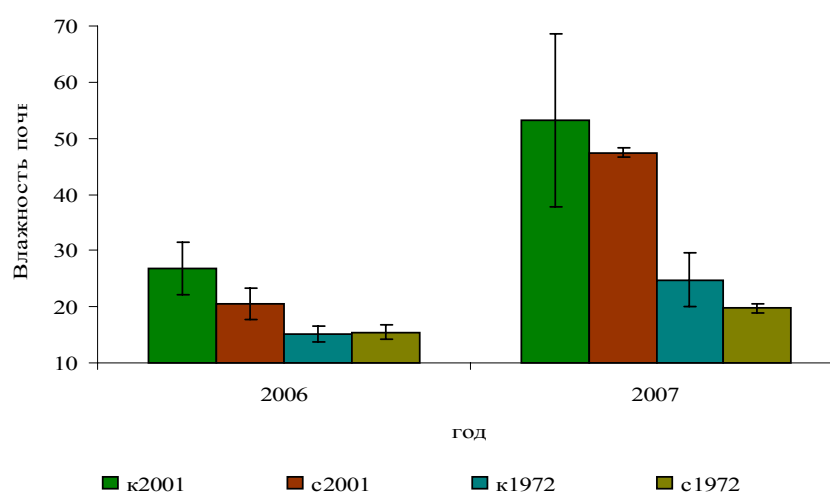


Рис. 5. Среднеиюльская влажность почвы на глубине 5 см на солифлюкционном участке 2001 и 1972 гг. и в контроле

Таблица 3. Характеристика начального состояния растительного сообщества и его динамика во время сукцессии в июле 2006 г. (Бугаенко и др., 2005)

Участок	Количество видов	Из них:		
		Сосудистые	Мхи	Лишайники
Контроль солифлюкции 2001г. (средняя часть склона)	26	18	6	2
Солифлюкция 2001г.	30	27	3	0
Контроль солифлюкции 1972г.	26	11	9	6
Солифлюкция 1972г.	26	16	6	4

Таблица 4. Средние значения почвенного дыхания и мощности напочвенного покрова для средней части склона солифлюкции различной давности

	Дыхание почвы, $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Мощность напочвенного покрова, см
Солифлюкция 2001г.	$5,8 \pm 1,4$	$1,1 \pm 0,6$
Контроль солифлюкции 2001г.	$6,3 \pm 0,2$	$8,5 \pm 1,3$
Солифлюкция 1972г.	$13,8 \pm 0,9$	$5,7 \pm 0,9$
Контроль солифлюкции 1972г.	$11,8 \pm 0,2$	$5,3 \pm 1,4$

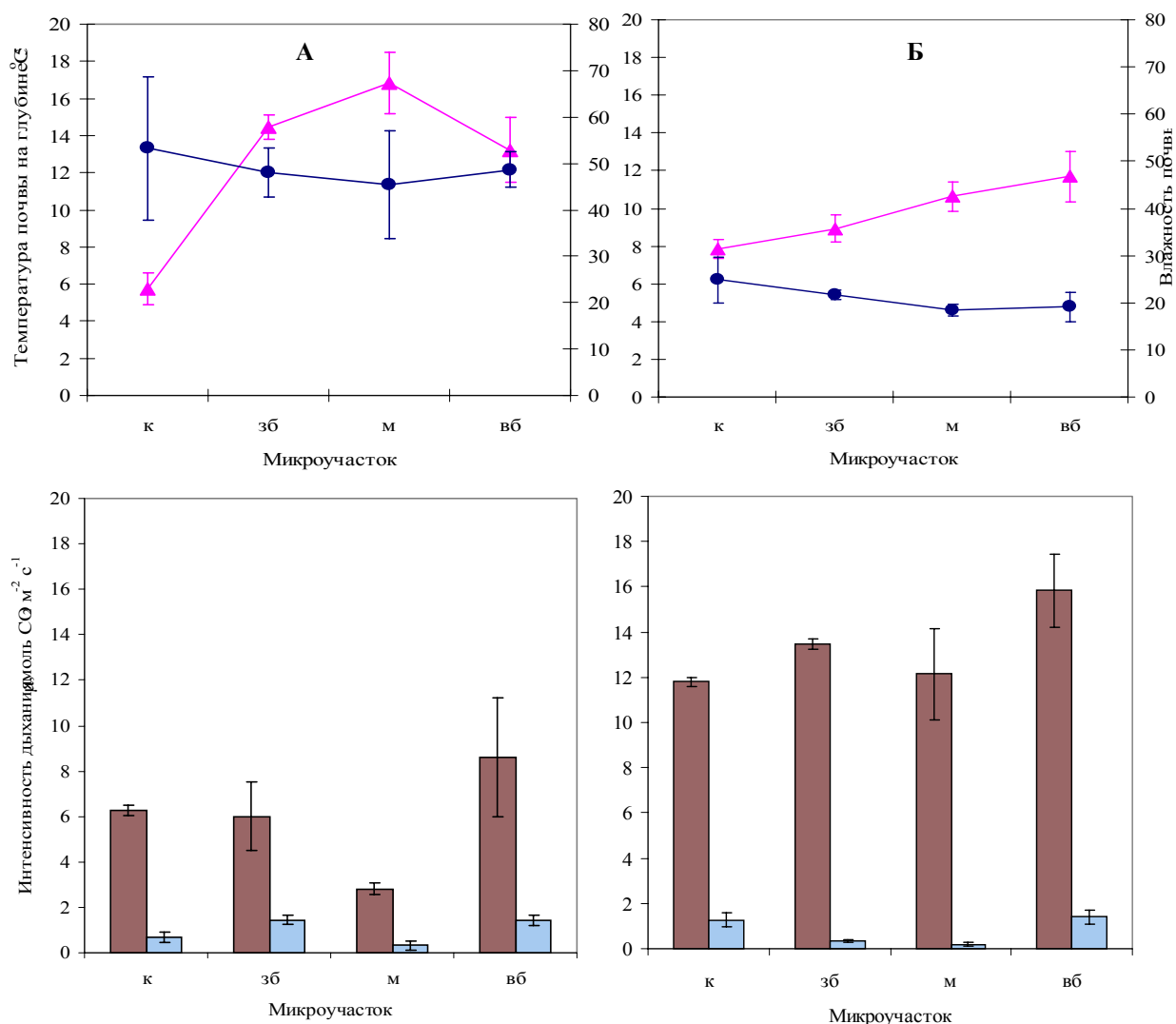


Рис. 6. Гидротермические условия, почвенное и микробное дыхание на отдельных микроучастках на солифлюкциях 2001 г. (А) и 1972 г. (Б). к – контроль, вб – восточная бровка, м – мелкозем, зб – западная бровка.

▲ Температура почвы на глубине 5 см

● Влажность почвы

■ Дыхание почвы

■ Микробное дыхание

Проведенный на трансектах учет подроста и самосева *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. и других древесных пород показал, что общее число особей древесных пород (на 1 га) на более молодом солифлюкционном участке (2001 г. – 2744 шт.) в 3.5 раза больше, чем на старом (1972 г. – 626 шт.) (Бугаенко и др., 2005).

Исследование интенсивности дыхания почвы показало, что таковое значительно выше на солифлюкции 1972 г., чем на солифлюкции 2001 г., включая соответствующие им неповрежденные листовенничники (табл. 4). Так, если на «старой» солифлюкции и в контроле дыхание почвы составляло в среднем около $11.8-13.8 \text{ } \mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, то на «молодой» солифлюкции эмиссия углекислоты с поверхности почвы значительно ниже ($5.8-6.3 \text{ } \mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Рассматривая изменения мощности напочвенного покрова после солифлюкции (табл. 4), необходимо отметить, что на солифлюкции 1972 г. эта величина сходня с контролем, тогда как на «молодой солифлюкции» разница между средними значениями напочвенного покрова (живой напочвенный покров с подстилкой) составляет 8 раз, что свидетельствует о нарушении целостности экосистемы. Интенсивность дыхания в среднем несколько ниже на солифлюкции 2001г. по сравнению с контролем, что вероятно и обусловлено нарушением напочвенного покрова, а в некоторых случаях его полным уничтожением.

Микрорельеф является фактором усиливающим вариабельность изучаемых параметров, в том числе таких гидротермических характеристик как температура почвы и влажность. На солифлюкционном участке 2001 г. температура и влажность почвы сильнее варьируют в зависимости от типа микроучастка (рис. 6) в отличие от солифлюкции 1972 г. Исследование динамики почвенного дыхания в зависимости от микроучастка показало, что на солифлюкционном участке старшего возраста (1972 г.) эти различия были сглажены между участками и незначительно отличались от коренных насаждений (рис. 6). Вместе с тем, на «молодой солифлюкции» отмечена значительная вариабельность эмиссии CO_2 между микроучастками: наибольшие величины дыхания отмечены на восточной бровке ($8.6 \text{ } \mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$), тогда как на мелкоземе она минимальная и составляла всего $2.8 \text{ } \mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Таблица 5. Доля микробного дыхания (%) в общем выделении углекислоты с поверхности почвы на солифлюкционных участках 2001 и 1972г.

Тип микроучастка	2001 г.	1972 г.
к	11	11
зб	24	2
м	12	1
вб	17	9

Следует отметить, что на контрольных участках солифлюкций разных лет доля микробного дыхания в общем выделении углекислоты с поверхности почвы совпадает – 11%

(табл. 5). На более «молодой» солифлюкции доля микробного дыхания выше, чем в контроле, особенно на бровках – в 2 раза. На более старой солифлюкции, наоборот, доля микробного дыхания меньше либо сопоставима с величиной в контроле.

Анализ микробной биомассы (МБ) в минеральном слое почвы на постсолифлюкционных участках разного возраста и контроле показал, что на контрольных участках солифлюкции 2001 г. основная биомасса микрофлоры (до 80%) сосредоточена в 0-5 см слое. На солифлюкции же, её биомасса в верхнем 0-5 см слое ниже - 30-60% от общего в 0-10 см слое и она, в зависимости от степени повреждения почвенного покрова, варьирует здесь в широких пределах: максимум на западной и восточной бровках и минимум на мелкозем (рис. 7А). В целом, общая биомасса микробиоты на солифлюкции 2001 г. значительно выше, чем в контроле, что связано, вероятно, с экологическими условиями, сложившимися здесь в постсолифлюкционный период. На солифлюкции 1972 г. общая МБ ниже, чем на контроле. Вместе с тем в мелкозем, в отличие от солифлюкции 2001г. содержание в почве МБ приближалась к микроучасткам на бровках, что свидетельствует о постепенном восстановлении и выравнивании численного микробного фона в минеральном слое почвы данного постсолифлюкционного участка.



Рис. 7. Биомасса микроорганизмов в минеральном слое почвы на постсолифлюкционных участках 2001 г. (А) и 1972 г. (Б).

Одним из показателей эко-физиологического статуса микробной популяции является коэффициент микробиологической активности – qCO_2 , который в норме варьирует в пределах единицы. В связи с этим отклонение в ту или другую сторону указывает на нарушение нормального функционирования почвенной микробиоты. Анализ коэффициентов микробиологической активности почв на исследуемых участках выявил высокую степень нарушенности функционирования микрофлоры на западной бровке и мелкозем 5-летней солифлюкции (рис. 8А), а на 35-летней солифлюкции – на восточной бровке и также на мелкозем (рис. 8Б). В целом, степень нарушенности функционирования почвенной микрофлоры на 35-летней солифлюкции существенно ниже, чем на «молодой», однако последствия солифлюкции сохранились и здесь. Из всего вышеизложенного можно

заключить, что восстановление эко-физиологического статуса микрофлоры на постсолифлюкционных участках протекает достаточно медленно.



Рис. 8. Коэффициенты микробиологической активности в минеральном слое почвы на солифлюкциях 2001г. (А) и 1972г. (Б).

Заклучение

Таким образом, микроэкологические условия, складывающиеся на первоначальном этапе постсолифлюкционной сукцессии, резко отличаются от микросреды в коренном лиственничном насаждении. Они также существенно различаются между отдельными микроучастками солифлюкции. Наиболее экстремальные условия для восстановления растительности отмечены на микроучастке с мелкозёмом. Значительное варьирование гидротермических условий на солифлюкции 2001 г. вызвало увеличение варьирования почвенного дыхания. Также было отмечено, что на начальном этапе постсолифлюкционной сукцессии биомасса почвенных микроорганизмов выше и доля микробного дыхания тоже выше, чем в контроле или на солифлюкционном участке 1972 г.

На более «старом» солифлюкционном участке 1972 г. различия между гидротермическими условиями в поврежденном и неповрежденном сообществе практически сглажены, лишь температура почвы на солифлюкции 1972 г. несколько выше, чем в контроле. Почвенное дыхание и доля микробного дыхания здесь сопоставимы с контролем, почвенная микробная биомасса несколько ниже, чем в контроле. Коэффициент микробиологической активности указывает на стабилизацию микробного сообщества в постсолифлюкционном участке, т.е. приближении его к состоянию контрольного сообщества, за исключением микроучастка восточной бровки.

Полученные результаты указывают на то, что в условиях многолетней мерзлоты Центральной Эвенкии нарушенная солифлюкцией лиственничная экосистема возвращается к своему первоначальному уровню примерно через 35 лет.

Благодарности

Авторы работы благодарят Российский Фонд Фундаментальных Исследований за оказанную финансовую поддержку (гранты № 03-04-48037; 05-05-64208; 07-04-96812) и Министерство образования и науки Российской Федерации и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № RUX0-002-KR-06, программа «Фундаментальные исследования и высшее образование»).

Литература

1. Абаимов А.П. Лиственничные леса и редколесья севера Сибири (Разнообразие, особенности экологии и лесообразовательного процесса): Автореф. дис. д-ра биол. наук. Новосибирск, 1997. 32 с.
2. Бугаенко Т.Н., Орешенко Д.А., Шкикунов В.Г. Восстановление лесной растительности на солифлюкционных участках в криолитозоне // Исследования компонентов лесных экосистем Сибири: Материалы конференции молодых ученых, 21-22 марта 2005, Красноярск, Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, С. 12-14.
3. Жигарев Л. А. Причины и механизм развития солифлюкции // М. 1967.
4. Катина Т.Н. Криогенные склоновые процессы // М.: Наука, 1965. 296 с.
5. Поздняков Л.К. Мерзлотное лесоведение // Новосибирск: Наука, 1986. 191 с.
6. Sparling G.T. The substrate-induced respiration method / Sparling G.T. In: Alef K., Nannipieri P.(eds). Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press, 1995. pp. 397-404.