

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

УДК 631.48

ПОСТПИРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЧВ И ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА В ПРЕДТУНДРОВЫХ РЕДКОЛЕСЬЯХ КОЛЫМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ: КАСКАДНЫЙ ЭФФЕКТ И ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ¹

© 2015 г. Н.С. Мергелов

Институт географии РАН, Москва, Россия; mergelov@igras.ru

Поступила в редакцию 20.10.2014 г.

Установлено, что высокое разнообразие плакорных экосистем предтундровых редколесий Нижней Колымы обусловлено частыми пожарами. От силы и давности пожара зависит тип сукцессий, мощность деятельного слоя, степень оглеенности почвенного профиля, интенсивность процессов криогенного массообмена, величина запасов углерода, классификационный статус почв. Постпирогенные трансформации растительности, почв и древесных пород развиваются по каскадному принципу, когда каждое предыдущее изменение генерирует и усиливает последующее изменение. Активно работают механизмы обратных связей. В первые годы после пожара наблюдается ожидаемое снижение запасов углерода органогенных горизонтов ($\Delta = -3.4$ кг С /м²), однако на более поздних стадиях возникает постпирогенный эффект избыточного (по отношению к первоначальному) накопления ОВ на минеральной поверхности ($\Delta = +1.7$ кг С/м²). Такие последствия пожаров как опускание–поднятие кровли мерзлоты и интенсификация криогенного массообмена в условиях активного накопления органического вещества верхних горизонтов могут приводить к постпирогенному росту пула углерода минеральной толщи ($\Delta = +2.5$ кг С/м²). Время, необходимое для восстановления после сильного пожара исходных запасов почвенного С_{орг}, составляет 60–200 лет.

Ключевые слова: предтундровые редколесья, почвы, почвенный углерод, деятельный слой, лесные пожары, экстремальные условия почвообразования, пирогенные катастрофы.

Введение. Воздействие лесных пожаров на ландшафт в криолитозоне часто сопровождается каскадным эффектом – за катастрофическим изменением растительного покрова следуют быстрые и нарастающие изменения температурного и гидрологического режимов почв и пород, состояния кровли многолетнемерзлых пород, меняется углеродный обмен почв с атмосферой и т.д. Это вновь оказывает влияние на растительность в связи с инициированием механизмов обратной связи. С экологической точки зрения, лесные пожары в пределах криолитозоны более опасны, чем за ее пределами, так как вызывают существенно иные

и долговременные экологические последствия по сравнению с другими природно-климатическими областями [14].

Изучение постпирогенной трансформации ландшафтов позволяет оценить реакцию геосистем на экстремальные колебания значений факторов, а также помогает изучить возможный их предельный отклик, например, на быстрые и резкие климатические изменения. Последние сопоставимы по характерному времени с изменениями биоты, экосистем и их сукцессий [17, 18]. Каскадный эффект в системе “растительность–почва–мерзлые породы” при лесных пожарах можно рассматривать как аналог трансформации геосистем по каскадному типу при глобальных изменениях.

Большая часть территории Колымской низменности сложена многолетнемерзлыми высокольд-

¹ Работа выполнена в рамках темы программы фундаментальных исследований Президиума РАН П-44 “Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации” и гранта РНФ № 14-27-00133 (концептуальное обобщение полученных ранее данных).

стыми отложениями лёссово-ледового комплекса. Эти породы плейстоценового возраста, сложного эолового и аллювиального генезиса представляют собой субстрат чрезвычайно чувствительный к климатическим изменениям и тем более к пирогенным катастрофам и подверженный деградации по каскадному типу. Отложения содержат 1–2% органического углерода в виде детрита и темного гумуса [5–7]. Большая часть органического вещества законсервирована в мерзлом состоянии. При повышении температур отложений и залегающих на них почв запускаются по каскадному принципу процессы термокарста и термоэрозии, усиливается криогенный массообмен, а древний органический углерод включается в современные циклы. Такие последствия могут оказывать влияние на климатические параметры благодаря увеличивающейся эмиссии парниковых газов. Учитывая, что площадь, занимаемая отложениями лёссово-ледового комплекса, в России составляет не менее 1 000 000 км², каскадный эффект при их деградации может быть значительным.

Известно, что дневные почвы тундры и предтундровых редколесий на многолетнемерзлых отложениях на северо-востоке России также содержат значительные запасы органического углерода (оценки колеблются – 20–45 кг/м² для тундровых и 20–60 кг/м² для “мерзлотно-таежных” почв [10]; 7.6–13.2 кг/м² в среднем для зональных почв тундры и лесотундры Якутии [21]; 15.1 кг/м² для почв предтундровых редколесий Колымской низменности [12]) и очень чувствительны к резким изменениям внешних факторов.

Хотя большую часть Колымской низменности занимает тундра, предтундровые редколесья предпочтительны для изучения *масштабных* катастрофических изменений, связанных с пожарами. Слабое разложение растительного опада в лесах мерзлотного региона приводит к накоплению такого количества горючего материала, которое при континентальном климате в засушливые сезоны становится источником возникновения лесных пожаров [3]. Многие сомкнутые бореальные леса могут быть менее горючими, чем редкостойные, в которых отсутствие конкуренции за освещенность приводит к сохранению нижних ветвей, а солнечная радиация и ветер легче проникают к поверхности почвы и высушивают мохово-лишайниковый покров до пожароопасного состояния [32–34].

Кроме того, важна роль огня в процессах обезлесивания, которая возрастает по периметру ареала лесных экосистем, например, в предтундровых редколесьях. Известно, что огонь определяет формирование “полосы относительного безлесья

тундры” на севере Евразии (от 100 до 300 км шириной), когда климат и грунты благоприятны для лесной растительности, но периодические пожары препятствуют развитию деревьев. С другой стороны, уничтожение огнем мохового покрова в лесотундровом экотоне при поступлении семян деревьев может благотворно сказываться на лесовозобновлении, но на короткий срок. Впоследствии развитие в лиственничнике сплошного ковра из зеленых мхов, образующих торфянистый горизонт, способствует поднятию кровли многолетнемерзлых пород, заболачиванию почвы и поселению сфагновых мхов [19]. Понижение температуры и ухудшение аэрации почвы вызывают гибель корней лиственницы, изреживание и отмирание древостоя. А.П. Тыртиков [19] считал, что лес на северном пределе отступает к югу не столько под влиянием изменений климата, сколько под воздействием процессов заболачивания, вытеснения его тундровой растительностью и пожаров.

Существует и другая гипотеза касательно смещения границы лес–тундра. Появление леса меняет энергетический баланс. За счет большего поглощения энергии [24, 25] больше тепла поступает в почвы, следовательно, они глубже протаивают [33]. Срабатывает механизм положительной обратной связи – чем больше тепла благодаря лесной растительности поступает в почву, тем больше она тает, тем лучше себя чувствуют корневые системы и собственно деревья. Лес начинает наступать на открытые пространства, в особенности на своем северном пределе, что наблюдается в ряде ситуаций [31; 33]. Однако этот механизм не реализуется на высокольдистых мерзлых отложениях. Так как вслед за прогревом высвобождаются огромные запасы влаги, которые приводят к заболачиванию, формированию блокирующего поступление семян в почву сфагнового покрова, т.е. запускается механизм, описанный А.П. Тыртиковым. Кроме того, в результате пожаров в редколесьях Северо-Востока Якутии на льдонасыщенных грунтах образуются термокарстовые озера, болота, аласы, которые недоступны для леса длительные периоды ($n \cdot 10^1$ – 10^3 лет) до начала естественной эволюционной стадии осушения.

В Якутии только за период с 2004 по 2009 гг. от 1337 лесных пожаров выгорели биотопы на общей площади 682 300 га и образовались гари суммарной площадью 482 750 га [14]. В целом же почти за четыре столетия хозяйственного освоения региона практически не осталось лесных массивов (на 88% представлены лиственничниками), в той или иной степени не затронутых огнем

[14–16]. Сведений о постпирогенном функционировании экосистем на северном пределе распространения древесной растительности именно Колымской низменности практически нет.

По совокупности перечисленных фактов лиственничные предтундровые редколесья Колымской низменности были выбраны в качестве приоритетного ключевого участка для оценки постпирогенной трансформации системы “растительность–почва–мерзлые породы”.

Объекты и методы исследований. Исследования растительного и почвенного покровов проводили в лиственничных предтундровых редколесьях на правом берегу Колымы в окрестностях пос. Черский (68° с. ш., 161° в. д.) на территории общей площадью 130 км². Здесь расположен один из наиболее континентальных с точки зрения климата участков на северном пределе распространения древесной растительности. За год выпадает 150–300 мм осадков, при этом на летний период приходится всего 60–130 мм. Среднелетняя величина коэффициента увлажнения по Иванову составляет 0.6–0.8. Наряду с достаточно высокими летними температурами и большими запасами напочвенного горючего материала в лиственничниках (основная порода *Larix cajanderi*) это создает предпосылки для возникновения пожаров. Последние являются в основном антропогенными, т.к. грозы крайне редки. Региональной особенностью лиственничных лесов является их адаптация к засушливому климату и периодическому воздействию огневого фактора, в связи с чем можно говорить о своеобразной пирофитности лиственницы Каяндера и пирофильности образуемых ею лесов [8].

В основу исследования легли данные полевых наблюдений (всего 85 почвенных разрезов), и космические снимки высокого разрешения (Ikonos, разрешение 1 · 1 м). Основными объектами исследования стали суглинистые криогидроморфные глеевые и неглеевые почвы предтундровых редколесий Колымской низменности, формирующиеся на отложениях лёссово-ледового комплекса [4, 11, 20]. В соответствии с Классификацией почв России [9] они относятся к различным подтипам глееземов и криоземов. Для расчетов запасов почвенного углерода использовались данные полевых исследований, прямые расчеты содержания $C_{орг}$, объемных весов, площади выделов из составленной нами карты почвенного покрова района исследований. Запасы углерода в каждом почвенном выделе рассчитывались на глубину сезонного протаивания. Для обеспечения сопоставимости данных при оценке постпирогенной динамики запасов углерода последние рассчи-

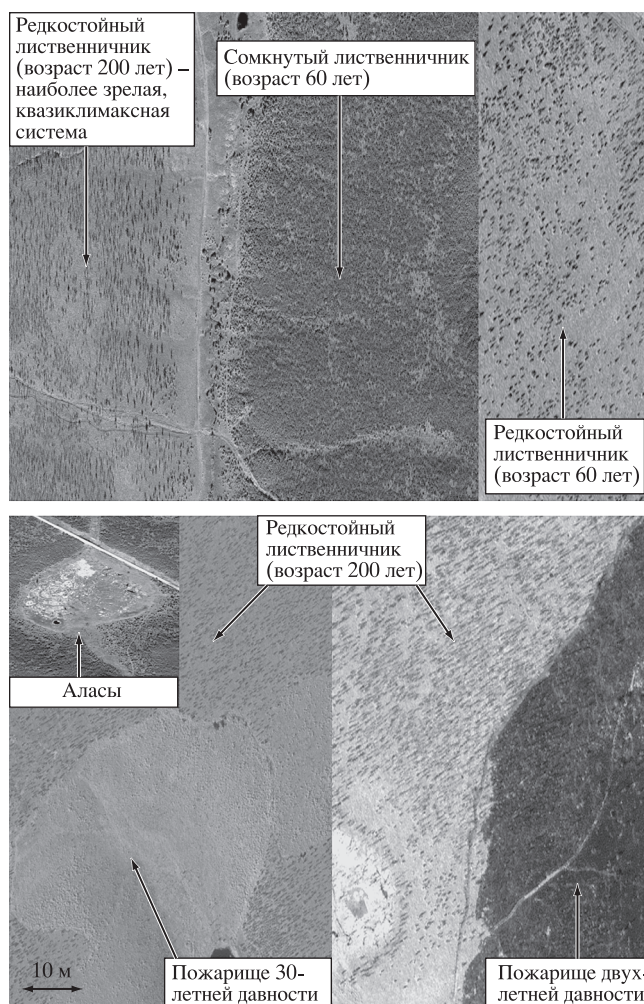


Рис. 1. Постпирогенные сукцессии на космических снимках Ikonos (оригинальное разрешение 141 м).

тывались в минеральных горизонтах – для слоя мощностью 50 см, а в органогенных горизонтах – на их фактическую мощность. При расчетах учитывалась микрокомплексность почвенного покрова. Запасы $C_{орг}$ оценивались отдельно для каждого компонента комплекса (почвы бугорка, пятна, ложбины), а впоследствии усреднялись для всего комплекса.

Результаты и обсуждение. На ключевом участке в предтундровых редколесьях Колымской низменности на породах единого генезиса, на одних и тех же элементах рельефа в непосредственной близости сосуществуют экосистемы, соответствующие различным этапам постпирогенного лесовозобновления (рис. 1).

Одной из наиболее зрелых экосистем региона является старовозрастной редкостойный лиственничник (возраст ~200 лет). На вершине и центральной части едомных водоразделов развиваются лиственничники со злаково-кустарничко-

Таблица. Состав растительного покрова в различных постпирогенных экосистемах

Постпирогенные этапы возобновления растительности	Время, прошедшее с момента последнего пожара, годы	Преобладающие виды растений
Старовозрастный лиственничник	200	Лиственница Каяндера, березка тощая, ива сизая, ива красивая, голубика, брусника, багульник стелющийся, аулякомниум
Сомкнутый лиственничник	60	Лиственница Каяндера, березка Миддендорффа, ива сизая, голубика, брусника, аулякомниум
Редкостойный лиственничник	60	Лиственница Каяндера, березка Миддендорффа, ива сизая, голубика, брусника, багульник стелющийся, зубровка альпийская, вейник незамечаемый, аулякомниум
Гарь без древесной растительности	30	Хвощ полевой, иван-чай узколистный, иван-чай широколистный, ива аляскинская, ива сизая, голубика, березка тощая, брусника, вейник пурпурный, щавель сибирский, аулякомниум, пелтигера
Гарь без древесной растительности	2	Хвощ луговой, иван-чай узколистный, брусника, крестовник скученный (к. арктический), щавель сибирский
Гарь без древесной растительности	1	Хвощ луговой

во-лишайниково-моховым напочвенным покровом и бугорковатым микрорельефом, в нижней части склона формируются лишайниково-злаково-моховые ассоциации и бугоркато-кочкарный микрорельеф, в долинах временных/постоянных водотоков, дренирующих едомные водоразделы, господствуют злаково-мохово-ивовые ассоциации с кочкарным микрорельефом. Широко распространены экосистемы сомкнутого высокопродуктивного лиственничника (возраст 30–60 лет), редкостойного молодого лиственничника (средний возраст 60 лет) (таблица).

Направленность постпирогенных сукцессий зависит, прежде всего, от характера пожара (низовой, верховой – преобладают низовые) и его интенсивности. Существенным оказывает-

ся также наличие в первые годы после пожара достаточного поступления или почвенного пула жизнеспособных семян. При выполнении последнего условия сукцессия может пойти по пути формирования лиственничника с плотным древостоем, который впоследствии саморазрешается (рис. 2).

А.П. Тиртиков [19] указывал, что возобновление древостоя на гарях возможно только в особо благоприятных условиях вблизи плодоносящих деревьев. Это бывает редко, т.к. образование семян в редколесьях происходит не чаще чем один раз в 10 лет. В остальных случаях гари захватываются тундровой, кустарниковой растительностью со сплошным покровом из мхов и лишайников, на котором возобновление древесных пород затруднено [19].

На ключевом участке при сильном пожаре и отсутствии семян могут сформироваться безлесные территории с кустарничково-травянистым покровом, устойчивые к появлению лиственницы в течение как минимум 30–40 лет. Однако впоследствии эти участки все равно заселяются лиственницей. Формируется редкостойный лиственничник.

Для лиственничников Нижней Колымы как и для Якутии в целом характерны коротковосстановительные (без смены основной породы) сукцессии [8]. Формирование сукцессий с другими лесообразующими породами, которые были бы

**Рис. 2.** Последовательность смены постпирогенных сукцессий.

устойчивы, по крайней мере, в течение одного поколения, не происходит.

Почвенный покров едомных поверхностей представлен мезокомбинациями суглинистых криогидроморфных почв: криоземов и глееземов. Педогенез на автономных поверхностях под старовозрастными сукцессиями имеет преимущественно окислительный тренд. Об этом четко говорит тот факт, что на плакорах преобладает неглеевое почвообразование, неоглеенные или слабооглеенные разности – криоземы, занимают до 70% едомных пространств. Глееземы имеют сплошное распространение на свежих заболоченных гаях и в других аккумулятивных позициях.

Величина среднего запаса общего органического углерода в деятельном слое криогенных суглинистых почв на ключевом участке – 15.1 кг/м². Общие запасы почвенного углерода ключевого участка площадью 130 км² составляют 1.9 Мт. В среднем около 60% запаса $C_{орг}$ деятельного слоя приходится на минеральные горизонты. Наибольшее количество углерода (до 30.1 кг/м²) содержится в глееземах, занимающих в ландшафте аккумулятивные позиции и имеющих мощные органогенные горизонты.

Проведенные расчеты показали, что запасы углерода в минеральной части плакорных почв (рассчитанные на глубину деятельного слоя) в большинстве случаев превышают запасы $C_{орг}$ в поверхностных органогенных горизонтах (торфянистых, грубогумусовых) (рис. 3). В минеральных горизонтах почв, формирующихся в предтундровых редколесьях Колымской низменности на отложениях лёссово-ледового комплекса (едома), может содержаться до 85% углерода профиля почвы (криоземы глеевые и типичные). Это опровергает распространенное представление, что на северо-востоке Евразии, в частности, на территории Колымской низменности, органическое вещество накапливается преимущественно на поверхности, в верхней органогенной части почв, в виде подстилки, торфа или грубого гумуса. Лишь для почв, развивающихся в аккумулятивных позициях (логах, оврагах, термокарстовых депрессиях – аласах и т.д.), а также в поймах запасы $C_{орг}$ преобладают в органических горизонтах (доля $C_{орг}$ минеральных горизонтов <50%).

Феномен высокой насыщенности органическим углеродом минеральной толщи суглинистых криогидроморфных почв связан с целым комплексом процессов: (I) гумусонакопление за счет разложения корневого опада *in situ*, (II) криогенный массообмен (криотурбации), (III) мерзлотная ретинизация – миграция и накопление водораство-

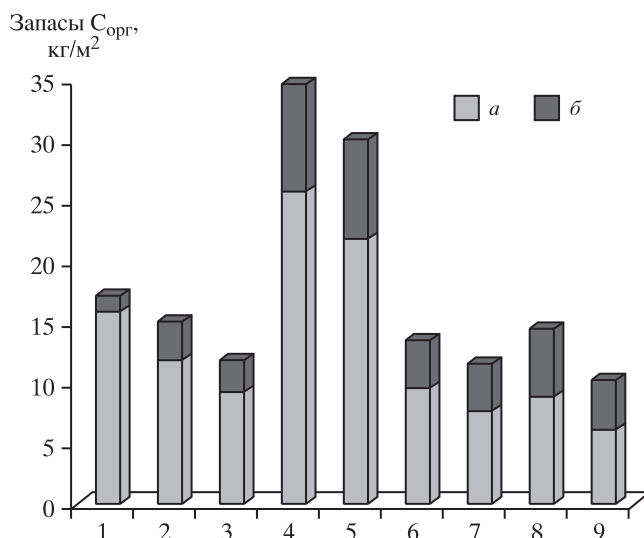


Рис. 3. Соотношение запасов углерода в минеральных (a) и органогенных (б) горизонтах суглинистых почв Колымской низменности.

Средние значения запасов углерода для типов почв: 1 – криоземов палево-метаморфизованных, 2 – криоземов типичных, 3 – криоземов грубогумусированных, 4 – аллювиальных дерновых почв, 5 – торфяно-глееземов, 6 – криоземов перегнойных, 7 – криоземов глееватых, 8 – торфяно-криоземов глеевых, 9 – глееземов.

римого органического вещества над мерзлотой, а также (IV) наследование высокого содержания органического углерода ($C_{орг}$) от почвообразующей породы [12].

Результат воздействия любых изменений окружающей среды, включая пожары, на углеродный баланс в экосистеме зависит от изменения фотосинтетической и дыхательной активности, другими словами, от надземных и подземных (внутрипочвенных) процессов. Последние изучены крайне недостаточно, но потенциально могут провоцировать ряд важных обратных связей в углеродном цикле климатической системы [29].

При оценке постпирогенной динамики органического вещества также обычно отслеживаются изменения его запасов лишь в подстилках и верхних органоминеральных горизонтах [1]. Изменение же запасов в минеральных горизонтах, на которые приходится основная доля пула углерода, практически не изучалось.

Постпирогенная трансформация в системе “почва–мерзлые породы”. Общие на первых послепожарных этапах закономерности трансформации почвенного покрова (увеличение глубины протаивания, увеличение влажности почвы за счет вытаивания шлирового и жильного льда, усиление степени оглеенности, интенсификация криотурбационных процессов) на следующих

этапах претерпевают изменения в зависимости от направленности постпирогенной сукцессии (рис. 4).

Развитие после пожара сомкнутого лиственничника, которому сопутствует мощный лишайниково-кустарничково-моховый (доминируют мхи) напочвенный растительный покров, приводит к стабилизации почвенного покрова. Не успевают развиваться термокарстовые процессы. Мощность деятельного слоя резко уменьшается (со 120–140 см до 30–50 см). Морфологические признаки оглеения и криотурбаций в профиле выражены слабо. При разрежении густого лиственничника усиливается парцеллярность напочвенного растительного покрова, уменьшается доля мхов, увеличивается присутствие лишайников. Напочвенный растительный покров редкостойного старовозрастного лиственничника состоит из регулярно чередующихся кустарничково-моховых и мохово-лишайниковых парцелл-полигонов. Различия в теплоемкости мхов и лишайников – парцеллообразующих растений приводят к неоднородности в глубине протаивания, варьирование которой также носит регулярный характер (рис. 5). Средняя мощность сезонно-талого слоя под кустарничково-моховой парцеллой – 25 см, под мохово-лишайниковой – 45 см.

На безлесных участках с кустарничково-травянистым покровом даже спустя 30–40 лет после пожара наблюдается большая мощность деятельного слоя 90–120 см, проявляются термокарстовые процессы – закладывается полигональный микрорельеф. Блюдцеобразные понижения (диаметр 1–4 м) соответствуют местам пересечения ледяных жил, которые частично протаивают при уничтожении растительного покрова при пожаре, вызывая тем самым термопросадки (относительные превышения 20–50 см). Структура профиля почвы свидетельствует об интенсивных процессах криогенного массообмена.

Эффект быстрого увеличения при пожаре глубины протаивания (на более чем 100% за первый год), способной сохраняться на данном уровне в течение длительного времени, приводит к уникальному пути эволюции конкретной почвы, когда в почвообразование быстро и на существенный срок включаются нижележащие, как правило, оглеенные слои породы. Такой тип эволюции возможен лишь в криолитозоне. Более того, увеличение мощности деятельного слоя приводит к вытаиванию шлирового, а иногда и жильного льда, при этом высвобождается избыточное количество влаги, стимулирующее в условиях затрудненного дренажа процесс оглеения. Все это при-

водит к изменению классификационного статуса конкретной почвы, вплоть до типового уровня [9] (рис. 6). Так почва, диагностируемая до пожара как криозем метаморфизованный/типичный, в зависимости от фактического прироста глубины протаивания, степени исходной оглеенности породы, наличия ледяных жил и т.д., может быть после пожара отнесена к криозему глееватому или даже к глеезему.

Вовлечение в почвообразование оттаявшей подстилающей породы, которая содержит существенные запасы органического углерода (в среднем 1–2%), может привести к включению прежде законсервированного $C_{\text{орг}}$ в современные циклы, и как следствие, увеличению эмиссии CO_2 с поверхности почвы.

Динамика запасов углерода в почвах предтундровых редколесий в связи с пожарами. Как показано, постпирогенные почвенно-растительные сукцессии носят циклический характер. При одинаковых литологических и геоморфологических условиях это позволяет оценить динамику почвенных свойств, в том числе запасов углерода. Запасы углерода в минеральных горизонтах рассчитывались для слоя мощностью 50 см. Запасы углерода органогенных горизонтов рассчитывались на их фактическую мощность. Закономерности изменения запасов углерода в зависимости от давности пожара, типа сукцессии не столь очевидны (рис. 7).

Постпирогенное уменьшение запасов почвенного углерода наиболее существенно в органогенной части профиля. Вслед за ожидаемым снижением в первые годы после пожара ($\Delta = -3.4 \text{ кг C/m}^2$) запасы углерода в органогенных горизонтах постепенно увеличиваются, достигая через 60 лет первоначальных значений (в пределах варьирования величины) (тип сукцессии I) или даже превышая их ($\Delta = +1.7 \text{ кг C/m}^2$) (тип сукцессии II). Последнее характерно для экосистемы сомкнутого лиственничника с мощным моховым покровом, способствующим активному торфонакоплению.

Изменение запасов углерода в минеральных горизонтах носит иной характер. Для I типа сукцессии спустя 30 лет после пожара зафиксировано сокращение пула углерода в минеральных горизонтах, с резким ростом в следующей временной точке опробования (60 лет). Такой “неочевидный” скачок, по-видимому, контролируется двумя факторами: мощностью деятельного слоя и криотурбациями. По нашим данным, спустя 30–60 лет после пожара, глубина протаивания уменьшается, стремясь к своим первоначальным значениям,

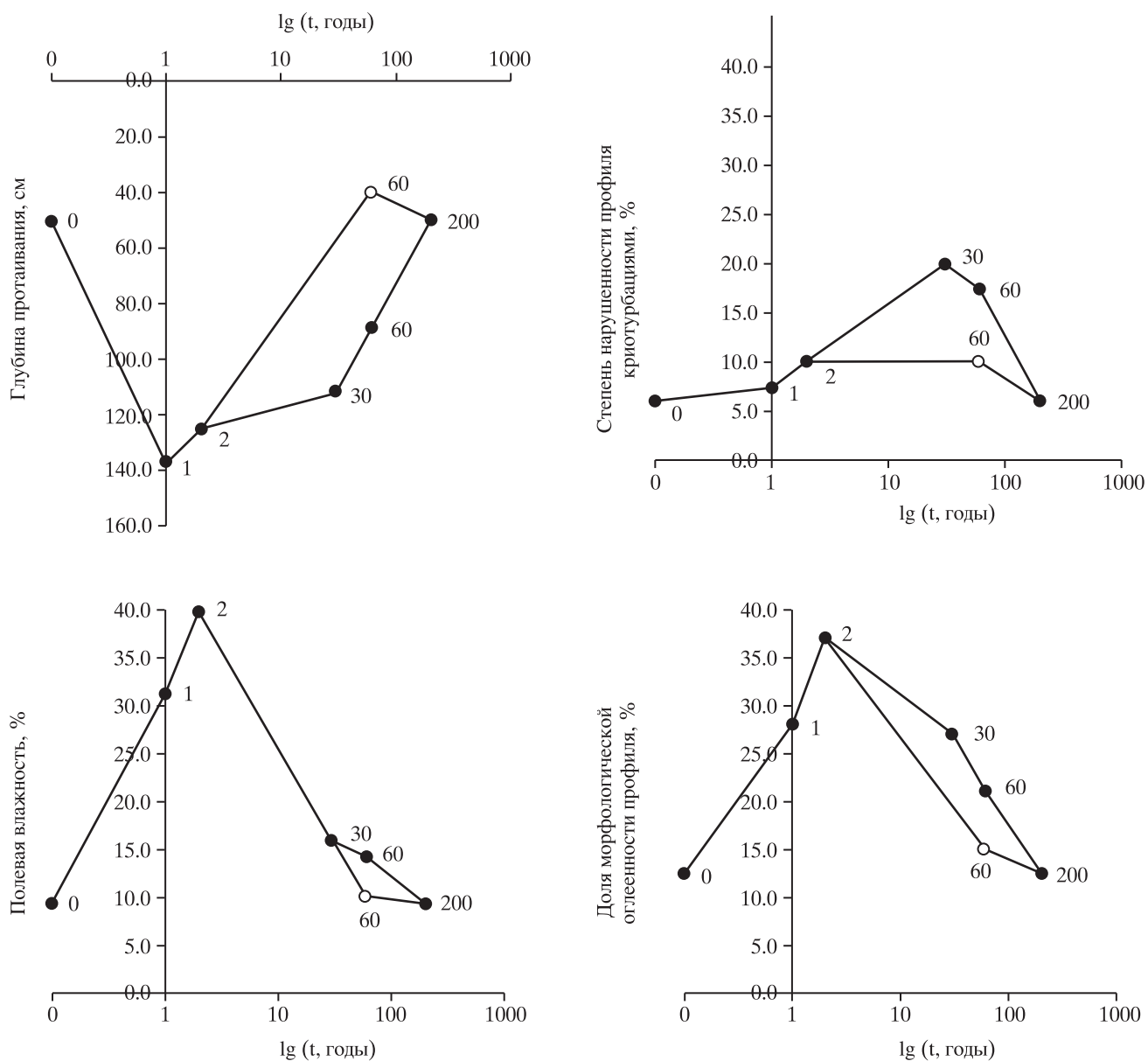


Рис. 4. Изменение свойств почв в зависимости от давности пожара и/или типа постпирогенной сукцессии.

1 – последовательное послепожарное развитие редкостойного лиственничника, 2 – развитие через стадию сомкнутого лиственничника.

Время, прошедшее с момента последнего пожара, годы	Постпирогенные этапы возобновления растительности
0	Старовозрастной редкостойный лиственничник
1	Гарь без древесной растительности
2	Гарь без древесной растительности
30	Гарь без древесной растительности
60	Редкостойный лиственничник
60	Сомкнутый лиственничник
200	Старовозрастной редкостойный лиственничник

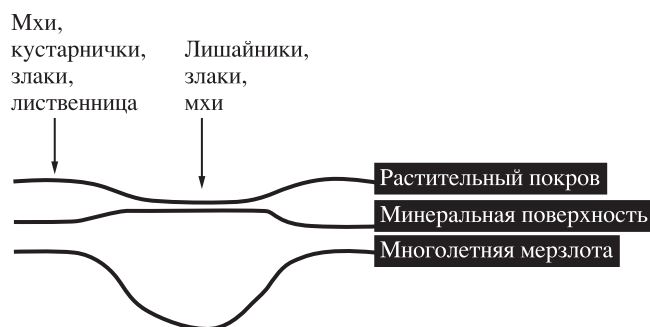


Рис. 5. Соотношение поверхности растительного покрова, минеральной поверхности почвы и подошвы деятельного слоя (старовозрастной редкостойный лиственничник).

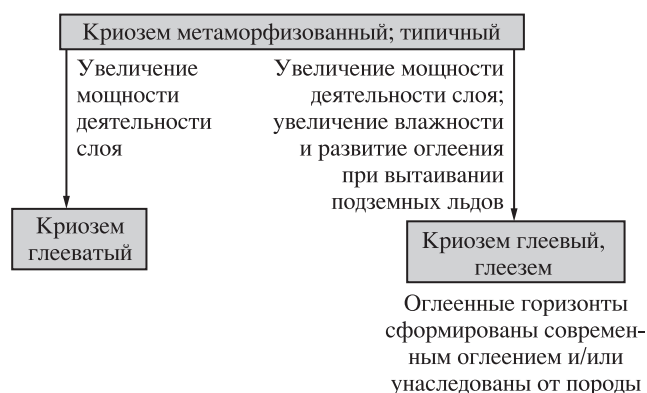


Рис. 6. Схема постпирогенной эволюции почв.

одновременно с этим наибольшее развитие получает процесс криогенного массообмена (оценивался косвенно по морфологическим признакам). Криотурбации в условиях подступающей кровли мерзлоты и уже сформированного органогенного мата, наиболее интенсивно обогащают минеральную толщу органическим веществом. Схожая тенденция наблюдается и для II типа сукцессий (30-летний минимум здесь не зафиксирован, возможно, вследствие отсутствия точки опробования). На более ранних стадиях возможен и другой механизм обогащения минеральной толщи углеродом, когда криотурбации при увеличенной глубине протаивания и большой влажности активно «подтягивают» древний углерод из породы.

Таким образом, воздействие пожаров на пул почвенного углерода не однозначно. В первые годы после пожара наблюдается «классическое» снижение запасов углерода органогенных горизонтов, однако позже возникает постпирогенный эффект избыточного (по отношению к первоначальному) накопления ОВ на минеральной поверхности. В свою очередь такие пирогенные последствия как опускание–поднятие кровли мерзлоты и интенсификация криогенного мас-

сообмена в условиях активного накопления органического вещества верхних горизонтов и криотурбационное «затягивание» углерода породы могут приводить к увеличению пула углерода минеральной толщи.

Особенности постпирогенного бюджета углерода в почвах. Среди механизмов формирования *расходных статей* бюджета почвенного углерода помимо термомеханического уничтожения органогенного покрова важное место занимает метаболизация ОВ. Микробиологические процессы ускоряются вследствие улучшения гидротермических и трофических условий при высвобождении элементов минерального питания при пиролизе органического вещества [13]. В результате жизнедеятельности микроорганизмов может выделяться дополнительное тепло, провоцирующее дальнейшее протаивание, возникает так называемый «эффект навозной кучи» (*dung-heap effect*) [29]. Нелинейная положительная обратная связь при усилении таяния мерзлоты проявляется и в выделении дополнительного количества метана и диоксида углерода, усугубляющих парниковый эффект [29].

Другой механизм потенциальной мобилизации значимого количества органического углерода — это так называемый прайминг-эффект (*priming effect*) [29]. Добавление в почву субстратов с легко доступной энергией, например глюкозы и целлюлозы, активизирует гетеротрофные сообщества и может стимулировать разложение «древнего» стабильного углерода, в отдельных случаях снижать общее содержание углерода. Экспериментально показано, что добавление целлюлозы мобилизует глубокий внутрипочвенный углерод, считавшийся стабильным, тогда как другие факторы такие как температура, содержание азота или увеличение концентрации кислорода не оказывают воздействия на декомпозицию ОВ [26, 27]. Такой эффект теоретически может возникать при пожарах. В.В. Богданов [1] показал, что в свежих гарях (исходный биотоп — лиственничники Центральной Эвенкии) органическое вещество поверхностных горизонтов представлено, прежде всего, относительно «свежими» фракциями, такими как гемицеллюлоза и целлюлоза. Известно, что влияние пожара стимулирует как развитие биомассы микроорганизмов, так и дыхательную активность почвенной микрофлоры [13]. Это может достигаться из-за более благоприятного постпирогенного терморегима, а также за счет описанного выше прайминг-эффекта.

Среди механизмов формирования *доходных статей* бюджета почвенного углерода наименее изученным является криогенный массообмен,

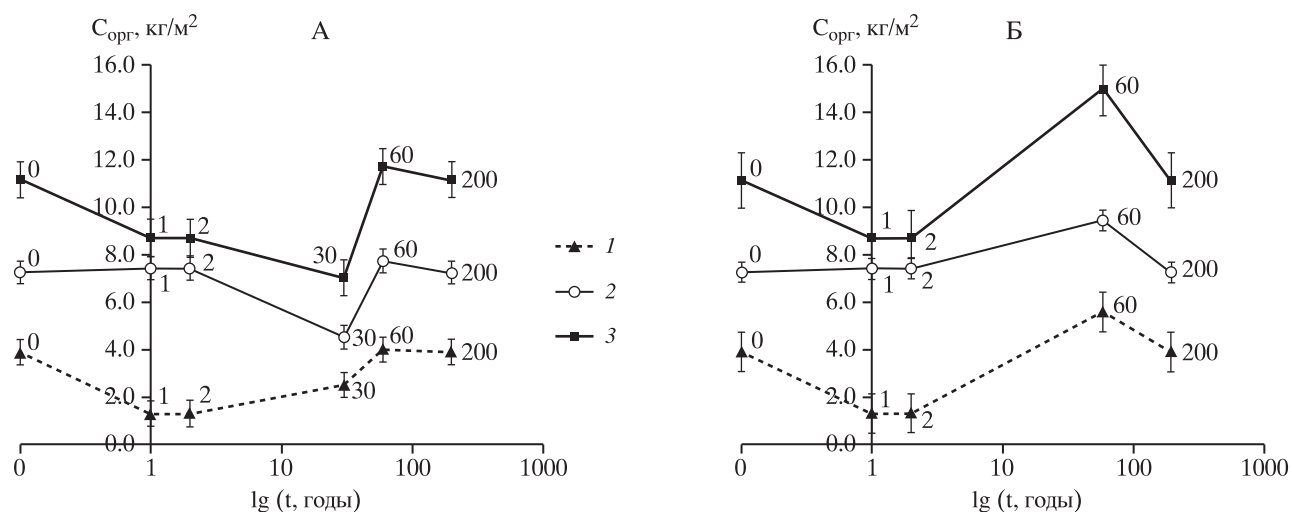


Рис. 7. Изменение запасов углерода в органических и минеральных горизонтах в зависимости от давности пожара и/или типа постпирогенной сукцессии.

А – последовательное послепожарное развитие редкостойного лиственничника, Б – развитие через стадию сомкнутого лиственничника. Запасы: 1 – в органических горизонтах, 2 – в 50 см минеральной толщи, 3 – суммарные.

Примечание: легенда – см. рис. 4.

включая криотурбации. На настоящий момент нам известна только одна крупномасштабная модель углеродного цикла, которая включает криотурбации в качестве процесса нарушения почв, представив его в виде диффузионного перераспределения органического углерода вглубь по профилю почвы [30]. Авторы показали, что криотурбации в сочетании с развитыми органическими горизонтами, воздействующими на тепловые свойства почв, приводили к значительному увеличению секвестрации почвенного органического углерода на протяжении тысячелетий, особенно на северо-востоке Евразии.

Многие из последних крупномасштабных моделей углеродного цикла учитывают лесные пожары в качестве одного из параметров [например, 22, 23]. Однако почвы по отношению к воздействию пожаров трактуются как статические объекты. Модели не рассматривают, каким образом потери и повторное накопление ОВ в почвах после пирогенных нарушений влияют на гидрологию, глубину грунтовых вод и зону аэрации [28]. И, наоборот, ни одна модель еще не в состоянии в полной мере учитывать, каким образом изменения гидрологии и температурной динамики почв, связанные с пирогенезом, влияют на динамику почвенного углерода в высоких широтах [28]. Таким образом, каскадный эффект при постпирогенной трансформации почв адекватно не учитывается в текущих моделях, описывающих нарушения цикла углерода в наземных экосистемах.

Следует отметить, что быстрое увеличение запасов почвенного углерода в ходе постпиро-

генных сукцессий может быть также обусловлено стадией травянистой растительности. По своему вкладу в глобальный сток и накопление углерода травяные экосистемы, по-видимому, не только сопоставимы, но и превосходят лесные [18]. В настоящей работе этот вопрос подробно не рассматривался.

Заключение. Одним из основных факторов, определяющих динамику растительного и почвенного покрова в предтундровых редколесьях северо-востока Колымской низменности, является пирогенез. От силы и давности пожара зависит тип сукцессий, глубина протаивания мерзлоты, интенсивность криотурбаций, степень оглеенности профиля, а также запасы углерода деятельного слоя и его включение в современные наземные циклы. Все плакорные почвы района исследований находятся на различных этапах постпирогенного развития, формируя неоднородность почвенного покрова.

Результаты воздействия пожаров на пул почвенного углерода неоднозначны. В первые годы после пожара наблюдается ожидаемое снижение запасов углерода органических горизонтов ($\Delta = -3.4 \text{ кг С/м}^2$), однако на более поздних стадиях возникает постпирогенный эффект избыточного (по отношению к первоначальному) накопления ОВ на минеральной поверхности ($\Delta = +1.7 \text{ кг С/м}^2$). Такие последствия пожаров как опускание-поднятие кровли мерзлоты и интенсификация криогенного массообмена в условиях активного накопления органического вещества верхних горизонтов могут приводить

к увеличению пула углерода минеральной толщи ($\Delta = +2.5 \text{ кг С/м}^2$). Время, необходимое для восстановления после сильного пожара исходных запасов почвенного $\text{C}_{\text{орг}}$, составляет – 60–200 лет.

Постпирогенные трансформации растительности, почв и пород развиваются по “каскадному” принципу, когда каждое предыдущее изменение генерирует и усиливает последующее изменение. Активно работают механизмы обратных связей. При этом исходный фактор (пожар + уничтожение растительного покрова) может уже не оказывать прямого влияния на удаленные звенья цепи последовательных и нарастающих трансформаций. Например, уничтожение напочвенного растительного покрова приводит к провальному и очень быстрому (1–2 года) протаиванию, жидкая вода, высвобожденная из жильного и шлирового льда, приводит к интенсификации криотурбаций, которые затрагивают верхнюю часть в прошлом мерзлых отложений и “поднимают” древнее органическое вещество ближе к поверхности. В результате может возникнуть “удивительный” эффект, когда после пожара, уничтожающего значительные запасы напочвенного органического вещества, в деятельном слое, тем не менее, складывается положительный баланс углерода. Однако впоследствии баланс выравнивается, т.к. древний углерод был “расконсервирован” и включился в современный атмосферный цикл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов В.В. Влияние низовых пожаров на органическое вещество почвы в криолитозоне Центральной Эвенкии. Автореф. ... дис. канд. биол. наук: Красноярск. 2010. 20 с.
2. Ведрова Э.Ф., Мухоморова Л.В., Безкоровая И.Н. и др. Органическое вещество почв лиственничников Северной тайги // Почвоведение. 2002. № 8. С. 967–974.
3. Габышева Л.П. Влияние пожаров на структуру и фитомассу лесных сообществ центральной Якутии // Совр. пробл. науки и образования. 2012. № 6.
4. Губин С.В. Динамика формирования структуры тундровых мерзлотных неглеевых почв (тундровых криоземов) // Почвоведение. 1993. № 10. С. 62–70.
5. Губин С.В. Палеогеографические аспекты почвообразования на Приморских низменностях Якутии. Пушино: ОНТИ НЦБИ, 1987. 27 с.
6. Губин С.В. Позднеплейстоценовое почвообразование на лёссово-ледовых отложениях Северо-Востока Евразии. Автореф. дис. ... докт. биол. наук: 1999. 36 с.
7. Губин С.В., Луначев А.В. Подходы к выделению и изучению погребенных почв в мерзлых толщах отложений ледового комплекса // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 2. С. 79–84.
8. Исаев А.П. Устойчивость лесов криолитозоны к антропогенным факторам // Успехи совр. естествознания. 2012. № 11. С. 41–43.
9. Классификация почв России / Шишов Л.Л. и др. М.: Почв. ин-т им. В.В.Докучаева, Докучаевское о-во почвоведов при РАН, 1997. 235 с.
10. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 246 с.
11. Мажитова Г.Г. Об особенностях почвообразования на едомах Колымской низменности // Почвоведение. 1989. № 9. С. 15–25.
12. Мергелов Н.С., Таргульян В.О. Процессы накопления органического вещества в минеральной толще мерзлотных почв приморских низменностей Восточной Сибири // Почвоведение. 2011. № 3. С. 275–287.
13. Прокушкин А.С. Водорастворимое органическое вещество в криогенных почвах пирогенных сукцессий. Аннотация к отчету по результатам реализации проекта РФФИ: 05-05-64208. 2005.
14. Тарабукина В.Г., Шумилов Ю.В. Пирогенная трансформация лесных почв в условиях криолитозоны // Продуктивность и устойчивость лесных почв / Мат-лы III междунар. конф. (Петрозаводск 7–11.09.2009 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 112–116.
15. Тарабукина В.Г., Саввинов Д.Д. Влияние пожаров на мерзлотные почвы. Новосибирск. 1990. 120 с.
16. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П. и др. // Леса среднетаежной подзоны Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 140 с.
17. Тишков А.А. Биогеографические последствия природных и антропогенных изменений климата // Успехи совр. биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 356–366.
18. Тишков А.А. Пожары в степях и саваннах // Вопр. степеведения. 2003. № 4. С. 9–15.
19. Тыртиков А.П. Лес на северном пределе в Азии. Т-во науч. изд. КМК, 1995. 144 с.
20. Фоминых Л.А. Особенности почвообразования в Колымских тундрах // Почвоведение. 1997. № 8. С. 917–926.
21. Честных О.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.Г. Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем России // Экология. 1999. № 6. С. 426–432.
22. Balshi M.S. et al. The role of historical fire disturbance in the carbon dynamics of the pan-boreal region: A process-based analysis // Journ. Geophys. Res. 2007. V. 112.
23. Beer C., Lucht W., Gerten D. et al. Effects of soil freezing and thawing on vegetation carbon density in Siberia: A modeling analysis with the Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model (LPJ-DGVM) // Global Biogeochem. Cycles. 2007. V. 21.

24. Chapin F.S. III et al. Role of land-surface changes in arctic summer warming // *Science*. 2005. V. 310(5748). P. 657–660.
25. Euskirchen E.S., McGuire A.D., Chapin F.S. et al. Changes in vegetation in northern Alaska under scenarios of climate change, 2003–2100: Implications for climate feedbacks // *Ecol. Appl.* 2009. V. 19(4). P. 1022–1043.
26. Fontaine S. et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply // *Nature*. 2007. V. 450. P. 277–280.
27. Fontaine S., Bardoux G., Abbadie L., Mariotti A. Carbon input to soil may decrease soil carbon content // *Ecol. Lett.* 2004. V. 7. P. 314–320.
28. Grosse G. et al. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance // *Journ. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. 1–23.
29. Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // *Nature*. 2008. V. 451. P. 289–292.
30. Koven C., Friedlingstein P., Ciais P. et al. The effects of cryoturbation and insulation by organic matter on the formation of high-latitude soil carbon stocks in a land surface model // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36.
31. MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Beilman D.W. Climate change and the northern Russian treeline zone // *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2008. V. 363(1501). P. 2285–2299.
32. Parisien M.A. et al. Contributions of ignitions, fuels, and weather to the spatial patterns of burn probability of a boreal landscape // *Ecosystems*. 2011. V. 14(7). P. 1141–1155.
33. Scheffer M., Hirota M., Holmgren M. et al. Thresholds for boreal biome transitions // *PNAS*. 2012. V. 109(52). P. 21384–21389.
34. Wirth C. Fire regime and tree diversity in boreal forests: implications for the carbon cycle // *Forest Diversity and Function: Temperate and Boreal Systems*. Springer. 2005. P. 309–344.
4. Gubin S.V. Dynamics of formation of structure of tundra permafrost nongleyic soils (tundra cryozems). *Pochvovedenie*, 1993, no. 10, pp. 62–70. (In Russ.).
5. Gubin S.V. *Paleogeograficheskie aspekty pochvoobrazovaniya na Primorskikh nizmennostyakh Yakutii* (Paleogeographic Aspects of Soil-Formation on Marine Lowlands of Yakutia). Pushchino: Otd. Nauchno-Tekh. Inform., Nauchn. Tsentra Biol. Issled., 1987. 27 p.
6. Gubin S.V. Late Pleistocene soil-formation on loess-glacial deposits of Northeastern Eurasia, *Extended Abstract of Doctoral (Biol.) Dissertation*, Pushchino, 1999. 36 p.
7. Gubin S.V. and Lupachev A.V. Approaches to selection and analysis of buried soils in permafrost massifs of sediments of glacial complex. *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 79–84. (In Russ.).
8. Isaev A.P. Resistance of permafrost forests to anthropogenic factors. *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2012, no. 11, pp. 41–43. (In Russ.).
9. *Klassifikatsiya pochv Rossii* (Classification of Soils of Russia), Shishov L.L., et al. Eds. Moscow: Pochv. Inst. im. V.V. Dokuchaeva, Ross. Akad. Nauk, 1997. 235 p.
10. Kobak K.I. *Bioticheskie komponenty uglerodnogo tsikla* (Biotic Components of Carbon Cycle). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1988. 246 p.
11. Mazhitova G.G. About peculiarities of soil-formation on yedomas of Kolyma lowland. *Pochvovedenie*, 1989, no. 9, pp. 15–25. (In Russ.).
12. Mergelov N.S. and Targulian V.O. Accumulation of organic matter in the mineral layers of permafrost-affected soils of coastal lowlands in East Siberia, *Eurasian Soil Sci.*, 2011, vol. 44, no. 3, pp. 249–260.
13. Prokushin A.S. *Vodorastvorimoe organicheskoe veshchestvo v kriogennykh pochvakh pirogennykh suksessii. Annotatsiya k otchetu po rezul'tatam realizatsii proekta Rossiiskogo Fonda Fundamental'nykh Issledovaniy no. 05-05-64208* (Water-Soluble Organic Substances in Cryogenic Soils of Pyrogenic Successions: Annotation to the Report on the Results of the Russian Foundation for Basic Research Project no. 05-05-64208), 2005.
14. Tarabukina V.G. and Shumilov Yu.V. Pyrogenic transformation of forest soil in cryolitozone, in *Mater. III mezhd. konf. "Produktivnost' i ustoichivost' lesnykh pochv," Petrozavodsk, 7–11 sentyabrya 2009 g.* (Proc. III Int. Conf. "Productivity and Resistance of Forest Soils," Petrozavodsk, September 7–11, 2009). Petrozavodsk: Karel. Nauch. Tsentr, Ross. Akad. Nauk, 2009, pp. 112–116. (In Russ.).
15. Tarabukina V.G. and Savvinov D.D. *Vliyanie pozharov na merzlotnye pochvy* (Influence of Wild Fires on Permafrost Soils). Novosibirsk, 1990. 120 p.
16. Timofeev P.A., Isaev A.P., Shcherbakov I.P., et al. *Les srednetazhnoi podzony Yakutii* (Forests of Mid-Taiga Subzone of Yakutia). Yakutsk: Yakut. Nauch. Tsentr, Sib. Otd., Ross. Akad. Nauk, 1994. 140 p.

REFERENCES

1. Bogdanov V.V. Influence of surface wild fires on soil organic substance in cryolite zone of Central Evenkia, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Krasnoyarsk, 2010. 20 p.
2. Vedrova E.F., Mukhortova L.V., Bezkorovainaya I.N., et al. Organic matter of soils under larch forests of the northern taiga in the Niznyaya Tunguska River basin. *Eurasian Soil Sci.*, 2002, vol. 35, no. 8, pp. 857–864.
3. Gabysheva L.P. The effect of wild fires on structure and phytomass of forest communities of Central Yakutia. *Sov. Probl. Nauki Obraz.*, 2012, no. 6, p. 569. (In Russ.).

17. Tishkov A.A. Biogeographical consequences of natural and anthropogenic climate changes. *Biol. Bull. Rev.*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 132–140.
18. Tishkov A.A. Fires in steppes and savannah, *Vopr. Stepevedeniya*, 2003, no. 4, pp. 9–15. (In Russ.).
19. Tyrtikov A.P. *Les na severnom predele v Azii* (Forest on Northern Edge of Asia). Moscow: KMK Publ., 1995. 144 p.
20. Fominykh L.A. The peculiarities of soil formation in the Kolyma tundra. *Eurasian Soil Sci.*, 1997, vol. 30, no. 8, pp. 811–819.
21. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., and Karelin D.V. Resources of organic carbon in the soils of tundra and forest-tundra ecosystems in Russia. *Russ. J. Ecol.*, 1999, vol. 30, no. 6, pp. 392–398.
22. Balshi M.S., et al. The role of historical fire disturbance in the carbon dynamics of the pan-boreal region: a process-based analysis. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 2007, vol. 112, no. 2, p. 29.
23. Beer C., Lucht W., Gerten D., et al. Effects of soil freezing and thawing on vegetation carbon density in Siberia: a modeling analysis with the Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model (LPJ-DGVM). *Global Biogeochem. Cycles*, 2007, vol. 21, GB1012.
24. Chapin F.S. III, et al. Role of land-surface changes in arctic summer warming. *Science*, 2005, vol. 310(5748), pp. 657–660.
25. Euskirchen E.S., McGuire A.D., Chapin F.S., et al. Changes in vegetation in northern Alaska under scenarios of climate change, 2003–2100: implications for climate feedbacks. *Ecol. Appl.*, 2009, vol. 19(4), pp. 1022–1043.
26. Fontaine S., et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, vol. 450, pp. 277–280.
27. Fontaine S., Bardoux G., Abbadie L., and Mariotti A. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecol. Lett.*, 2004, vol. 7, pp. 314–320.
28. Grosse G., et al. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *J. Geophys. Res.*, 2011, vol. 116, pp. 1–23.
29. Heimann M. and Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, vol. 451, pp. 289–292.
30. Koven C., Friedlingstein P., Ciais P., et al. The effects of cryoturbation and insulation by organic matter on the formation of high-latitude soil carbon stocks in a land surface model. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, pp. 1–5.
31. MacDonald G.M., Kremenetski K.V., and Beilman D.W. Climate change and the northern Russian treeline zone. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B*, 2008, vol. 363(1501), pp. 2285–2299.
32. Parisien M.A., et al. Contributions of ignitions, fuels, and weather to the spatial patterns of burn probability of a boreal landscape. *Ecosystems*, 2011, vol. 14(7), pp. 1141–1155.
33. Scheffer M., Hirota M., Holmgren M., et al. Thresholds for boreal biometransitions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2012, vol. 109(52), pp. 21384–21389.
34. Wirth C. Fire regime and tree diversity in boreal forests: implications for the carbon cycle, in *Forest Diversity and Function: Temperate and Boreal Systems*. New York: Springer-Verlag, 2005, pp. 309–344.

Post-pirogenic Transformation of Soils and Soil Carbon Stocks in Sub-Tundra Woodlands of Kolyma Lowland: a Cascading Effect and Feedbacks

N.S. Mergelov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; mergelov@igras.ru

It is found that the high diversity of the upland ecosystems in sub-tundra woodlands of the Lower Kolyma River is caused by frequent fires. The type of successions, the power of the active layer, the degree of gleization of the soil profile, the intensity of cryogenic processes of mass transfer, the size of carbon stocks, the classificatory status of soils depends on the strength and duration of the fire. Post-pirogenic transformation of vegetation, soils and tree species evolve according to the cascade principle, when every previous change generates and enhances subsequent change, i.e. feedback mechanisms are working actively. In the first years after the fire the expected reduction in carbon stocks of organic horizons (–3.4 kilogram of carbon per square meter) is observed, however, in the later stages the post-pirogenic effect of surplus (relative to initial) accumulation of organic matter at mineral surfaces (+1.7 kilogram of carbon per square meter) occurs. Such consequences of fires as the lowering-lifting of roof permafrost and the intensification of cryogenic mass transfer in conditions of active organic matter accumulation of upper horizons can lead to post-pirogenic increase of the carbon pool of mineral depth (+2.5 kilogram of carbon per square meter). The time required to recover after a severe fire the initial stocks of soil carbon is 60–200 years.

Keywords: sub-tundra woodlands, soils, soil carbon, active layer, forest fires, extreme conditions of pedogenesis, pyrogenic catastrophes.