

УДК 630*232.4

ПУЛЫ ПИРОГЕННОГО УГЛЕРОДА ЛЕСНЫХ ПОЧВ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ¹

© 2022 г. С. В. Бряннин^а, *, А. В. Данилов^а, Е. С. Сулопарова^а, А. В. Иванов^а^аИнститут геологии и природопользования ДВО РАН, пер. Рёлочный, д. 1, Благовещенск, 675000 Россия

*E-mail: bruanin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Актуальность. Леса России удерживают самый значительный пул углерода С среди экосистем суши и подвержены периодическим пожарам. Продукты горения сохраняются в почвах тысячелетиями и на сегодняшний день считаются наиболее долговременным пулом С. Однако размер этого пула в почвах до сих пор остается пробелом в знаниях о структуре запасов С в лесах России. **Цель.** Определить содержание и структуру запасов общих и высокостабильных форм пирогенного С (РуС), оценить долю выделяемых форм РуС в составе С почв и изучить взаимосвязь РуС с характеристиками насаждения и свойствами почв периодически прогорающих лиственничных лесов Верхнего Приамурья. **Объекты и методы.** В работе представлены данные первой полевой оценки пула общих и устойчивых форм пирогенного С в почвах регулярно прогорающих лиственничников Верхнего Приамурья по трансекте 500 км с севера на юг. Изучали общие и устойчивые формы пирогенного углерода, определяли запасы и мощность подстилок, плотность почв, влажность, рН, Сорг, N. **Результаты.** В верхнем слое почвы общая концентрация РуС изменяется в пределах от 1 до 2.2%, а запасы достигают 3.3 т га⁻¹. Доля общего РуС в пуле органического С почвы достигает 21%, а доля высокоустойчивых форм РуС не превышает 4%. Анализ главных компонент выявил, что концентрация и запасы общего РуС в почвах не зависят от почвенных свойств, однако имеют тенденцию к увеличению на север. При этом содержание и запасы высокостабильных форм РуС, являющиеся признаками пожаров высокой интенсивности, положительно и достоверно коррелируют с долей лиственницы в составе древостоя. **Выводы.** Наши результаты свидетельствуют о преобладании низовых пожаров низкой интенсивности, при которых не образуется большого количества высокостабильных форм РуС. Сила пожара, вероятно, положительно коррелирует с возобновлением лиственницы.

Ключевые слова: пожары, пирогенный углерод, лесные почвы, лиственничники, Дальний Восток.

DOI: 10.31857/S0024114822030044

В свете современного изменения климата и учащения природных пожаров остро стоит вопрос долговременной консервации углерода (С). Наиболее значимый вклад в стабилизацию С вносят экосистемы северного полушария (Dixon et al., 1994; Gauthier et al., 2015). Среди них леса boreального пояса России все еще удерживают самый значительный пул С по большей части в почвах. Недавние оценки показывают, что потенциал секвестрации С лесами России почти на 50% выше, чем считалось ранее (Schepaschenko et al., 2021).

Лиственничники — это самая представительная формация в лесном фонде России, они занимают около 40% лесопокрытой территории (Уткин и др., 2003). Эти леса регулярно подвергаются

горению, а в последние десятилетия наблюдается тренд возрастания площади пожаров (Лупян и др., 2017). Лесные пожары в северных лесах исторически являлись драйверами их развития, а цикл лесов в лиственничных экосистемах и вовсе невозможен без пожаров (Цветков, 2004). Однако за последние два столетия пожары из фактора динамики превратились в фактор деградации этих лесов (Sato et al., 2016). Очевидно, что при высокой пирогенной нагрузке в этих лесах сформировался существенный пул высокоуглеродистых продуктов горения, которые на сегодняшний день считаются наиболее устойчивым пулом С.

Постпирогенный углерод (РуС) представляет собой совокупность веществ от частично обугленных растительных остатков до угля, сажи и отдельных полициклических соединений (Bird et al., 2015; Preston and Schmidt, 2006). В процессе горе-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект 19-05-00305.

ния около 5% пиролизуемой биомассы преобразуется в PyC (DeLuca et al., 2020), а доля PyC в общих запасах почвенного органического вещества (Сорг) оценивается на уровне 2–5% в глобальном масштабе (Bird et al., 2015). Однако в почвах бореальной зоны, испытывающих высокие пирогенные нагрузки, его доля может быть значительно выше. Так доля PyC в органогенных горизонтах лесных почв Европы достигает 45% от пула Сорг (Schmidt et al., 1999). В почвах сосновых лесов Сибири это количество оценивается на уровне 4% от пула Сорг (Czimeczik et al., 2005), а в торфяниках Северных Увалов от 0.7 до 14% в верхнем слое (Дымов и др., 2021). Продукты горения в виде угля и сажи сохраняются в почвах от сотен до тысяч лет, и современные исследования подтверждают, что периодические низовые пожары способствуют поддержанию и увеличению такого пула в северных лесах (Думов et al., 2021). Объемы и структура пула PyC пока остаются неясными не только из-за недостаточности натуральных оценок, но и по методическим причинам.

В настоящее время отсутствует возможность прямого сопоставления PyC из результатов разных исследований ввиду того, что применяются различные аналитические методы, которые определяют отдельные фракции PyC. Это приводит к несовпадению результатов вплоть до нескольких порядков величин (Hammes et al., 2007; Schmidt et al., 2001). Наиболее признанным и распространенным на сегодня маркером PyC является метод выделения бензолполикарбонатовых кислот (БПКК), определяющий ароматические формы С посредством кислотного гидролиза (Brodowski et al., 2005). Метод твердотельной спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) покрывает весь спектр определяемых форм PyC (Masiello, 2004), однако является полуквантитативным, с его помощью изучается структура органического вещества пирогенного происхождения. Микроскопический визуальный метод отбора угля из почвы является самым точным, однако имеет ограничения ввиду определения только угольной фракции $PyC \geq 0.2$ мм (Ohlson et al., 2009). Кроме того, разработан ряд альтернативных методов определения PyC, среди которых термическое окисление и кислотная обработка наиболее распространены.

В нашем исследовании пул общего и высокостабильного PyC анализируется с использованием двух методов. Метод “СТО375” основан на термическом окислении пробы (Gustafsson et al., 1997). Изначально разработанный для изучения PyC в осадочных и техногенных отложениях, метод был с успехом протестирован на природных объектах (Gustafsson et al., 2001), в том числе и почвах, и применяется в современных исследованиях для оценки PyC и в лиственных лесах Азии (Huang et al., 2018; Makoto et al., 2011). Многократные испытания данного метода выявили,

что при обработке при 375°C вместе с органическим веществом почвы полностью окисляется и большинство низкотемпературных форм PyC (Nguyen et al., 2004). Поэтому данный метод характеризует в основном высокостабильные формы PyC (PyCст), образованные при температурах выше 800°C, характерные для очень мощных верховых пожаров. Метод “КМД”, предложенный в 2006 году V.J. Kurth с соавторами, заключается в удалении органического вещества сильным раствором H_2O_2 и слабой азотной кислотой (Kurth et al., 2006). Такой метод наиболее широко используется среди альтернативных (Abney et al., 2019; Maestrini and Miesel, 2017; Santos et al., 2017) и благодаря щадящей обработке пробы позволяет сохранить большинство форм PyC, включая низкотемпературные, характерные для низовых пожаров. Таким образом, метод оценивает общее количество PyC (PyCобщ).

Температуры горения и пиролиза биомассы во время лесных пожаров значительно различаются в зависимости от количества топлива, скорости ветра, температуры воздуха, влажности воздуха и топографии лесов. Несмотря на то, что PyC считается долговременным пулом С в почвах и сохраняется в них до тысячелетий (Preston et al., 2006), современные исследования доказывают, что пирогенные материалы, образованные при низких температурах в пожарах слабой интенсивности, быстрее подвергаются разрушению в почвенной среде чем PyCст (Abney et al., 2019; Bird et al., 2017).

Взаимосвязь PyC с почвенной средой подробно изучена во многих лабораторных исследованиях, а наибольшее внимание ему, как эффективному мелиоранту, уделяется в агроэкосистемах, особенно в малопродуктивных почвах. (Lehmann et al., 2011; Liang et al., 2006). Известно, что PyC разуплотняет почву, а пористая структура постпирогенного угля, на которой происходит адсорбция веществ, повышает емкость катионного обмена и микробиологическую активность (Lehmann et al., 2011; Li et al., 2018). Недавний обзор Makoto and Koike (2021) об экологической роли PyC в бореальных лесах обратил внимание на то, что PyC, будучи инертным материалом и долговременным стоком С, может ускорять современные потоки С в системе подстилка-почва-атмосфера. Современные зарубежные исследования перешли к рассмотрению вопросов миграции (Santín et al., 2015; Santos et al., 2017) и возможного разложения PyC (Guggenberger et al., 2008; Kasin and Ohlson, 2013; Kuzyakov et al., 2009), при этом в почвах российский лесов его содержание по сей день остается весьма неопределенным.

Цель исследований — определить содержание и структуру запасов общих и высокостабильных форм PyC, оценить долю выделяемых форм PyC в составе Сорг почв и изучить взаимосвязь PyC с характеристиками насаждения и свойствами почв

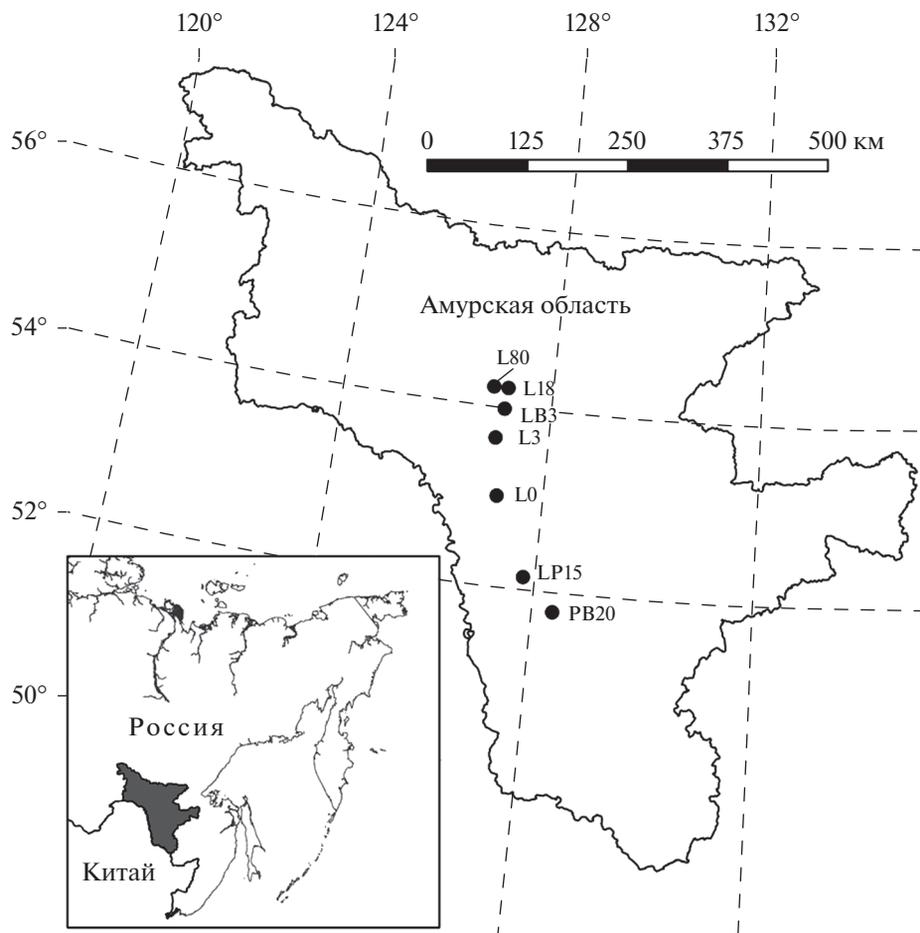


Рис. 1. Карта-схема района исследований.

периодически прогорающих лиственных лесов Верхнего Приамурья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование проведено в зоне светлехвойной тайги Верхнего Приамурья на южной границе распространения многолетней мерзлоты. Климат территории умеренно холодный, континентальный, с муссонным характером распределения осадков. Средняя многолетняя температура воздуха января минус 28.8°C, июля +19.7°C, среднегодовая – 0.7°C. Абсолютный минимум составляет –52.0°C, максимум +36.9°C. Среднее количество осадков 527 мм, большая их часть выпадает в летний период. Преобладают ветра северо-восточного направления со средней скоростью от 1.2 до 2.2 м с⁻¹.

Объект исследования – лесные насаждения с доминированием лиственницы даурской (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), находящиеся на разных стадиях послепожарной лесовосстановительной смены.

Полевые исследования выполнялись на пробных площадях (ПП) размером 50 × 50 м, которые были заложены по меридиональной трансекте протяженностью около 500 км в западной части Амурской области. Перепад абсолютных высот между крайними ПП трансекты составляет 356 м (рис. 1). Пробные площади были заложены в наиболее распространенных брусничных и багульниковых типах леса, в типичных для региона лесорастительных условиях с отсутствием каких-либо нарушений, кроме пожаров. На каждой ПП выполнено таксационное описание древостоя (учитывались все деревья с диаметром D1.3 ≥ 6 см) (табл. 1). Запас насаждения с учетом разряда высот определялся по региональным объемным таблицам. Возраст пожара определялся по возрасту подроста, до возраста 3–5 лет, и по космическим снимкам Landsat или официальным данным лесопользователей. Название ПП давали исходя из преобладающей на момент исследований древесной породы и возраста пожара. (табл. 1). В состав насаждений, кроме лиственницы, входили береза плосколистная (*Betula platyphylla* Suk.) и осина (*Populus tremula* L.), на долю которых приходится

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев лесных насаждений на пробных площадях

ПП	Географические координаты, WGS	$H_{\text{нум}}$, м	$A_{\text{п}}$, лет	Состав	$D_{\text{ср}}$, см	M , $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$	G , $\text{м}^2 \text{га}^{-1}$	N , шт. га^{-1}
L80	N 54°00'48.7" E 127°02'20.9"	551	80	8Л1Б+Е	35.3	181	15.7	204
L18	N 54°00'30.4" E 127°02'50.1"	554	18	7Л3Б+Ос	18.7	239	24.0	948
LB3	N 53°49'36.7" E 127°08'07.1"	565	3	4Л5Б1Ос	19.3	367	39.1	700
L3	N 53°39'27.8" E 127°01'33.6"	308	3	9Л1Б	24.3	40	3.9	76
L0	N 52°51'15.9" E 126°33'36.8"	334	0	9Л1Б	15.2	105	11.4	568
LP15	N 51°59'35.5" E 127°40'08.0"	268	15	5Л5С	26.2	116	12.3	156
PB20	N 51°38'50.8" E 128°10'38.7"	195	20	6С4Б+Л, Ос	16.4	174	24.0	1168

Примечание. $H_{\text{нум}}$ – абсолютная высота местности над уровнем моря, $A_{\text{п}}$ – возраст пожара, $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр главной породы, M – запас, G – абсолютная полнота, N – густота древостоя; Л – лиственница даурская, С – сосна обыкновенная, Б – береза плосколистная, Ос – осина. В аббревиатуре ПП: Л – лиственница, В – береза, Р – сосна, число обозначает возраст пожара.

10–60% запаса насаждения (табл. 1) Наличие этих видов так же указывает на нарушение насаждений лесными пожарами. Запас древостоев изменяется в диапазоне 40–239 $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$ со средним значением 174.5 $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$.

Сбор лесной подстилки осуществляли однократно в июле–августе с помощью рамки размером 20 × 20 см в пятикратной повторности на каждой ПП. Рамки для сбора подстилки располагали в наиболее типичных местах, исключались места, где сложение подстилки было нарушено (деятельность животных, прогалины, ямы и др). Отбор производили до границы верхнего органоминерального горизонта почвы (А), исключая крупные корни и древесные остатки. После отбора определяли мощность слоя подстилки путем измерения высоты всех стенок. Образец помещали в герметичный пакет. После сбора подстилки в тех же точках отбирали образцы почв с поверхности горизонта А(Ао). Образцы почв отбирали с помощью металлического цилиндра-пробоотборника диаметром 5 см, на глубину 5 см, объемом 99.8 см^3 . Образец помещали в герметичный пакет и замораживали для предотвращения испарения влаги и остановки деятельности микроорганизмов. После доставки в лабораторию образцы почв и подстилок высушивали до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 60°C. Запас подстилки рассчитывали в тоннах абсолютно сухого вещества на 1 га лесной площади. Запас Сорг в почвах рассчитывали, исходя из плотности сложения, мощности слоя и содержания С, результаты выражали в тоннах абсолютно сухой почвы на гектар лесной площади. Высушенные образцы почв истирали и просеивали через сито диаметром ячейки 0.25 мм для дальнейших аналитических исследований.

Аналитические исследования. Лабораторные исследования выполнены в аналитическом центре минералого-геохимических исследований Ин-

ститута геологии и природопользования ДВО РАН. Общие концентрации N и Сорг в почве анализировали методом термокаталитического окисления при температуре 680°C на анализаторе ТОС-L с модулем для ввода твердых проб SSM-5000A (Shimadzu, Япония). Актуальную кислотность почв определяли ионометрическим методом в соотношении вода : почва 1 : 5 на приборе Hanna 2215 (HANNA Instruments, Германия).

Содержание высокостабильных форм пирогенного С (**PyCст**) определяли методом “СТО375” (Gustafsson et al., 1997; Hammes et al., 2007). Принцип метода основан на длительной термической обработке почв при 375°C, с последующим определением остатков С. Навески около 0.5 г помещали ровным слоем в фарфоровые тигли и прокаливали в муфельной печи при температуре 375°C в течение 24 ч. Содержание PyCст термокаталитическим окислением аналогично Сорг.

Содержание общего пирогенного С (**PyCобщ**) выполняли методом “KMD” (Kurth et al., 2006). Принцип метода заключается в окислении органического вещества почв сильным раствором H_2O_2 в смеси с азотной кислотной и последующим определением оставшейся пирогенной части С. Навеску почвы 0.5 г помещали в коническую колбу объемом 250 мл, приливали 20 мл 30% H_2O_2 , оставляли на сутки до начала фактического разложения. Затем добавили 20 мл 30% H_2O_2 и 10 мл 1.0 М HNO_3 . Горловину колб накрыли воронкой. Колбы периодически взбалтывали при комнатной температуре в течение 30 мин, затем нагревали до 100°C на песчаной бане в течение 16 ч. Образцы периодически перемешивали и возвращали в песчаную баню до завершения разложения. Полноту разложения определяли по осветлению осадка и отсутствию вскипания. Осадок отделяли на фильтрах “красная лента”, высушивали, гомогенизировали с помощью ступки и пестика. Содержание PyCобщ в осадке определяли термокаталитиче-

ским окислением аналогично Сорг. Для почв с исходным высоким содержанием Сорг ($\geq 15\%$) применяли модифицированный метод с разбавлением пробы с прокаленным кварцевым песком в соотношении 1 : 1 (Maestrini and Miesel, 2017), дальнейший ход анализа не изменялся.

Статистическая обработка. На первом этапе данные проверялись на нормальность и однородность дисперсий. Наличие и достоверность различий параметров древостоя, характеристик подстилки, почвенных свойств и содержания Р_{уС} между ПП оценивались с помощью дисперсионного анализа и апостериорного теста Тьюки (Tukey HSD). В случае отсутствия нормального распределения данных использовался непараметрический критерий Краскела–Уоллиса. Основные закономерности в массиве данных определялись методом главных компонент. Все вычисления и визуализация результатов выполнены в статистической среде R (R Development Core Team, 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика почв постпирогенных лесов. Мощность и запасы лесной подстилки на исследуемых площадках варьируют в широком диапазоне (табл. 2), а средние значения равны 3.5 ± 0.15 см и 11.8 ± 0.7 т га⁻¹ соответственно. При этом зависимости от возраста пожара не наблюдается ни по одному из этих показателей (рис. 3). Исследование В.В. Старцева с соавт. (2017) в листовничниках криолитозоны установили мощность слоя подстилки в постпирогенных насаждениях в пределах 5–8 см, а в ненарушенном лесу – 17 см. Усредненные запасы С в подстилках по всем ПП с использованием общепринятого коэффициента МГ-ЭИК 0.37 составили 4.4 т С га⁻¹, что близко к оценке для южной части Дальнего Востока – 4.5 т С га⁻¹ (Иванов и др., 2018), однако ниже показателя 6 т С га⁻¹ для Амурской области согласно крупномасштабным оценкам О.В. Честных с соавт. (2007).

Влажность почв варьирует незначительно и не проявляет четких закономерностей в зависимости от возраста пожара. При этом многие исследователи отмечают уменьшение влажности из-за гидрофобности поверхностного горизонта после пирогенного воздействия и повышения альбедо прогоревшей поверхности (Certini, 2005; Старцев и др., 2017). Плотность сложения поверхностных горизонтов почв возрастает с севера на юг. Северные почвы содержат большое количество слабо-разложившихся растительных остатков и корней, которые разуплотняют поверхностные горизонты почв. К югу биологическая активность вместе с продолжительностью теплого периода возрастает, и скорость разложения органического вещества так же повышается, что приводит к более плотному сложению почв. Почвы исследуемой

территории в ненарушенном состоянии характеризуются кислой средой в северных лесах и слабокислой к югу (Proscorchuk and Bryanin, 2007). Актуальная кислотность почв в нашем исследовании имеет общий тренд возрастания с севера на юг трансекты, а максимальный сдвиг в щелочную сторону наблюдается на ПП L0 и LP15 с наименьшим возрастом пожара. Смещение реакции среды в сторону нейтрализации кислых растворов – одно из наиболее выраженных изменений в почвенных свойствах после пожара. Оно обусловлено поступлением катионов щелочных и щелочно-земельных элементов преимущественно с золой и наблюдается на протяжении десятилетий, в зависимости от факторов среды и типа насаждения (Makoto et al., 2011; Красношеков, 2014; Цибарт, Геннадиев, 2008). Содержание N не имеет четкой тенденции ни по возрасту пожара, ни по трансекте, обогащенность органического вещества почв азотом (C/N) возрастает к югу трансекты.

Концентрации и пулы углерода. Содержание Сорг изменяется в пределах от 7.7 до 19.6% с общим трендом на понижение к югу (табл. 2). Запасы Сорг в поверхностном слое почв варьируют от 16 до 27 т/га (рис. 2а). На Р_{уС}общ приходится до 21% запасов Сорг в исследуемом слое (рис. 2б). Доля Р_{уС}ст не превышала 4%, при этом взаимосвязь между двумя изучаемыми формами пирогенного С не была установлена ($R = 0.1, p = 1$). Однако наблюдалась слабая достоверная корреляция с концентрацией Сорг как для Р_{уС}общ ($R = 0.3, p = 0.01$), так и для Р_{уС}ст ($R = 0.4, p < 0.001$). Это означает, что увеличение количества общего Р_{уС} происходит не за счет накопления его устойчивых форм. При этом взаимосвязь обеих форм Р_{уС} с Сорг обусловлена тем, что эти формы входят в Сорг при термокаталитическом окислении. Установленные нами величины концентраций Р_{уС}ст в целом согласуются с аналогичными данными по органогенному горизонту почв сосновых лесов Сибири, где Р_{уС} определялся методом выделения бензолполикарбонновых кислот и его доля составила $\leq 3.5\%$ от Сорг (Czimeczik et al., 2005). Недавнее исследование торфяно-олиготрофной почвы под сосновыми лесами Северных Увалов также установило долю Р_{уС} по БПКК в поверхностном горизонте на уровне 0.6% от Сорг почвы. При этом авторы также установили возрастание доли Р_{уС} в составе Сорг почвы с глубиной (Дымов и др., 2021).

Взаимосвязь характеристик почв и почвенных параметров с содержанием и запасами Р_{уС}. Множественные регрессионные модели для Р_{уС}, включавшие в себя как характеристики древостоя, так и свойства почв выявили несколько значимых предикторов, однако описываемая ими доля дисперсии Р_{уС}общ и Р_{уС}ст слишком мала, чтобы принимать эти модели как достоверные. При этом анализ главных компонент позволил

Таблица 2. Основные характеристики почв исследуемых лесов

III	Лесная подстилка		Почва, слой 0–5 см									
	запас, т/га	мощность, см	влажность почв, %	pH водн.	плотность, г/см ³	Сорг, %	N, %	C/N	Р _{уСобш} , %	Р _{уСст} , %		
L80	11 ± 1.0a	6 ± 0.3a	38.9 ± 1.0a	5.31 ± 0.14a	0.30 ± 0.02a	17.7 ± 1.7a	0.57 ± 0.06ab	31	2.24 ± 0.24a	0.16 ± 0.03a		
L18	5.5 ± 0.4b	4 ± 0.4b	41.5 ± 2.4a	5.85 ± 0.15a	0.32 ± 0.04a	13.3 ± 1.8ab	0.72 ± 0.12ab	17	1.47 ± 0.35abc	0.52 ± 0.15b		
LB3	24.1 ± 2.0c	6 ± 0.2c	52.8 ± 2.3b	5.50 ± 0.11a	0.29 ± 0.03a	19.6 ± 2.2a	0.85 ± 0.08a	23	2.00 ± 0.30abc	0.26 ± 0.04ab		
L3	5.5 ± 1.1ab	2 ± 0.3d	54.2 ± 2.6b	6.09 ± 0.10c	0.34 ± 0.03ab	14.9 ± 2.2ab	0.77 ± 0.08ab	19	1.68 ± 0.24abc	0.28 ± 0.05ab		
L0	3.9 ± 0.5b	1 ± 0.1d	42.2 ± 2.7a	6.49 ± 0.18bc	0.43 ± 0.04ab	10.7 ± 1.4ab	0.56 ± 0.06ab	19	2.16 ± 0.32abc	0.25 ± 0.02ab		
LP15	10 ± 1.5ab	2 ± 0.2c	38.9 ± 4.4ab	6.56 ± 0.08b	0.54 ± 0.08ab	7.7 ± 1.3b	0.38 ± 0.06b	20	0.99 ± 0.20bc	0.20 ± 0.04ab		
PB20	18.6 ± 4.0ab	3 ± 0.4b	46.5 ± 2.2ab	5.78 ± 0.15a	0.50 ± 0.04b	11.4 ± 1.2ab	0.76 ± 0.08a	15	1.05 ± 0.14bc	0.16 ± 0.02a		

Примечание. Данные в таблице – средние ± 1 стандартная ошибка, n = 10 для всех показателей. Латинские буквы указывают на значимые различия на основе дисперсионного анализа или непараметрического критерия Краскела–Уоллиса.

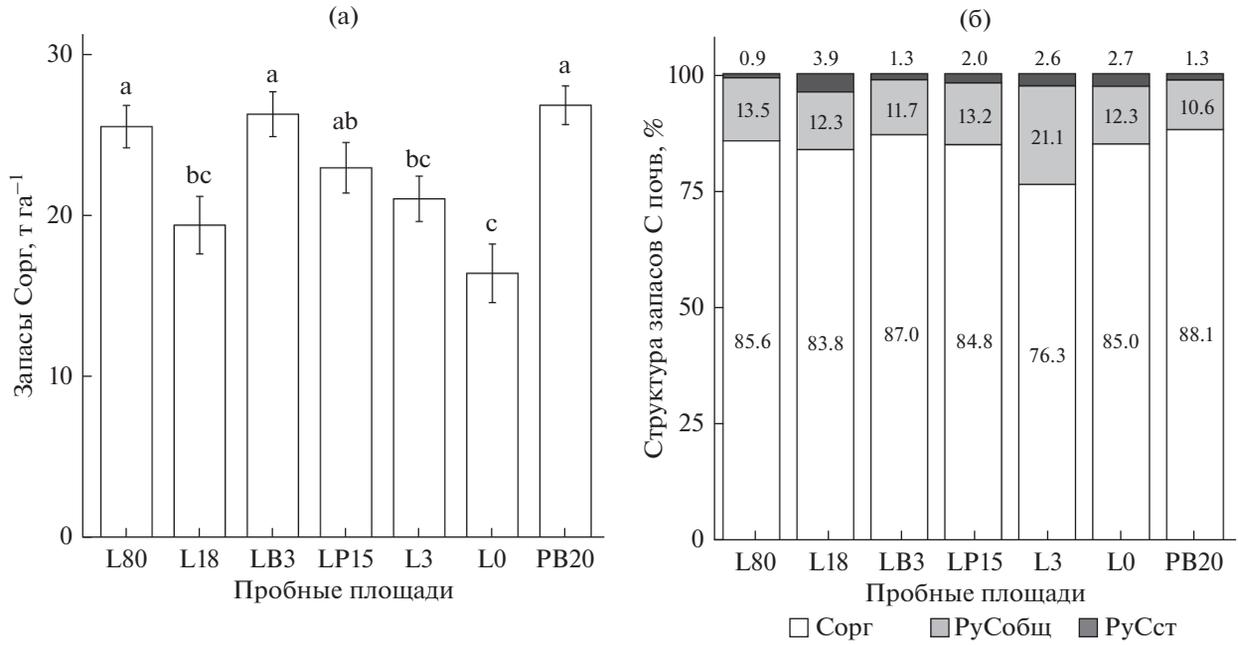


Рис. 2. Запасы органического С в слое почв 0–5 см (а) и доля пирогенного С в этих запасах (б). Латинские буквы указывают на значимые различия на основе непараметрического критерия Краскела–Уоллиса.

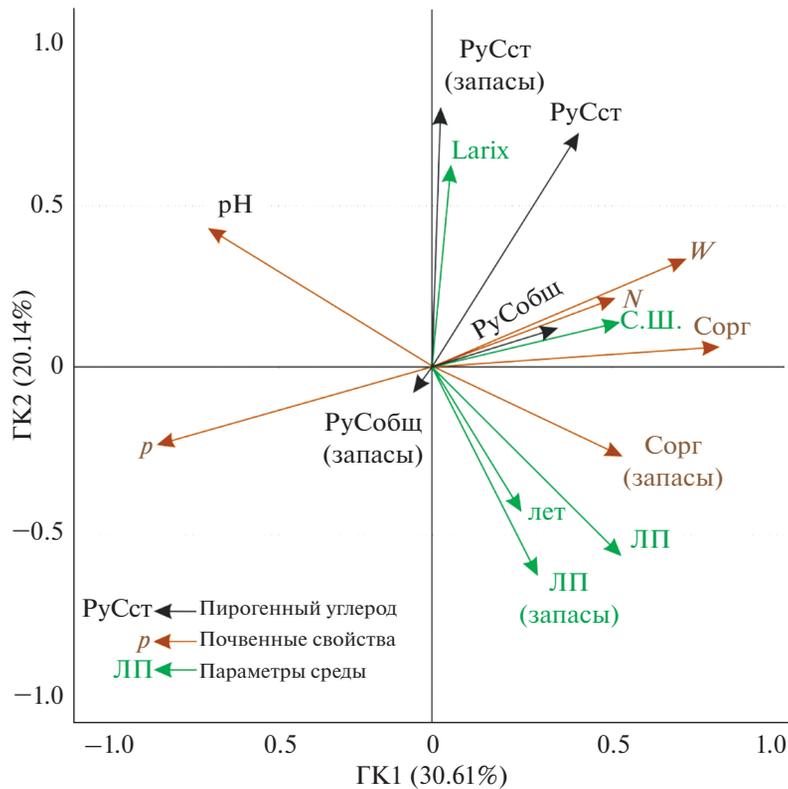


Рис. 3. Биplot на основе анализа главных компонент. PyCобщ, PyCст – содержание, %; PyCобщ (запасы), PyCст (запасы) – запасы т га⁻¹; W – влажность почв, ρ – плотность сложения почв, Larix – доля лиственницы в составе древостоя, С.Ш. – градус северной широты на ПП, ЛП – слой лесной подстилки, лет – возраст пожара.

описать более 50% дисперсии всего массива данных и выделить основные закономерности по направлению трансекты (рис. 3). Так, содержание Сорг и N возрастает на север вместе с увеличением почвенной влажности. С увеличением возраста пожара происходит увеличение мощности и запасов подстилки, а также запасов Сорг, вместе с тем происходит увеличение актуальной кислотности почв. Плотность сложения почв возрастает с севера на юг на фоне уменьшения влажности и отрицательной взаимосвязи с содержанием Сорг, N, РуСобщ и РуСст. Отрицательная взаимосвязь плотности сложения с содержанием РуС подтверждается рядом экспериментальных работ, обнаруживших, что внесение постпирогенного угля приводит к разуплотнению почв (Li et al., 2018). Кроме того, это свидетельствует о разнонаправленных трендах концентраций РуС в почве и показателя плотности по изучаемой трансекте. Содержание и запасы РуСст положительно коррелировали с долей участия лиственницы в составе древостоя ($R = 0.4$, $p < 0.01$) и не были связаны с почвенными свойствами. Наличие взаимосвязи РуСст с долей участия лиственницы в составе древостоя свидетельствует как о возобновлении преимущественно лиственницы, так и об устойчивости лиственничников к сильным пожарам. Это в целом является доказательством пиропитности этого вида, описанной в работе П.А. Цветкова (2004). Слабая взаимосвязь РуСобщ с кислотностью почв подтверждает данные о сдвиге почвенной кислотности на горяч за счет золы, а не пирогенного угля (Gonzalez–Perez et al., 2004; Neary et al., 1999).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования показывают, что в условиях Верхнего Приамурья на долю РуС может приходиться более 20% общего пула С органогенных и верхних минеральных горизонтов лесных почв. При этом доля высокостабильных форм РуС, образующихся при высоких температурах, не превышает 4%. Это может свидетельствовать о большем влиянии низкотемпературных низовых пожаров на формирование современного пула РуС в поверхностных горизонтах изученных почв. Выполненное исследование дает основание для более точного расчета запасов С в почвенном резервуаре лесных экосистем при региональных и глобальных оценках. Учитывая установленный значительный вклад РуС в общий пул С почв, а также способность РуС мигрировать вниз по почвенному профилю в будущих исследованиях, необходимо расширить работы в географическом масштабе с включением в оценку минеральных горизонтов лесных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дымов А.А., Старцев В.В., Горбач Н.М., Паюсова И.В., Табов Д.Н., Доннерхак О. Сравнение методов определения соединений углерода пирогенно измененных органических соединений // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1332–1345.
<https://doi.org/10.31857/s0032180x2111006x>
- Иванов А.В., Браун М., Замолотчиков Д.Г., Львов Д.В., Панфилова Е.В. Лесные подстилки как звено цикла углерода хвойно-широколиственных насаждений Южного Приморья // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1226–1233.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18100052>
- Краснощекоев Ю.Н. Влияние пирогенного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в центральной экологической зоне байкальской природной территории // Сибирский лесной журн. 2014. № 2. С. 43–52.
- Луян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценок Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активно-горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175>
- Старцев В.В., Дымов А.А., Прокушкин А.С. Почвы постпирогенных лиственничников Средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // Почвоведение. 2017. № 8. С. 912–925.
- Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г., Честных О.В. Органический углерод лиственничных лесов России // Хвойные бореальной зоны. 2003. Т. 21. № 1. С. 66–76.
- Цветков П.А. Пиропитность лиственницы Гмелина с позиций жизненных стратегий // Экология. 2004. № 4. С. 259–265.
- Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Влияние пожаров на свойства лесных почв Приамурья (Норский заповедник) // Почвоведение. 2008. № 7. С. 783–792.
- Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
- Abney R.B., Jin L., Berhe A.A. Soil properties and combustion temperature: Controls on the decomposition rate of pyrogenic organic matter // Catena. 2019. № 182. P. 104 127.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104127>
- Bird M.I., McBeath A. V., Ascough P.L., Levchenko V.A., Wurster C.M., Munksgaard N.C., Smernik R.J., Williams A. Loss and gain of carbon during char degradation. Soil Biology and Biochemistry. 2017. № 106. P. 80–89.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.012>
- Bird M.I., Wynn J.G., Saiz G., Wurster C.M., McBeath A. The Pyrogenic Carbon Cycle // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2015. V. 43. P. 273–298.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105038>
- Brodowski S., Rodionov A., Haumaier L., Glaser B., Amelung W. Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids // Organic Geochemistry. 2005. V. 36. № 9. P. 1299–1310.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2005.03.011>

- Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: A review // *Oecologia*. 2005. № 143. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Czimeczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.D.* Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // *European J. Soil Science*. 2005. V. 56. № 3. P. 417–428.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00665.x>
- DeLuca T.H., Gundale M.J., Brimmer R.J., Gao S.* Pyrogenic Carbon Generation From Fire and Forest Restoration Treatments // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2020. № 3. P. 1–8.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00024>
- Dixon R.K., Solomon A.M., Brown S., Houghton R.A., Trexler M.C., Wisniewski J.* Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems // *Science*. 1994. V. 263. № 5144. P. 185–190.
<https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Y., Valdes-Korovkin I.A., Farkhodov Y.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Guggenberger G.* Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (Subpolar Ural, Russia) // *Geoderma*. 2021. V. 404. № 115278. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115278>
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Shepaschenko D.G.* Boreal forest health and global change // *Science*. 2015. V. 349. № 6250. P. 819–822.
<https://doi.org/10.1126/science.aaa9092>
- Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J., Almendros G., Knicker H.* The effect of fire on soil organic matter – a review // *Environment International*. 2004. № 30. P. 855–870.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
- Guggenberger G., Rodionov A., Shibistova O., Grabe M., Kasansky O.A., Fuchs H., Mikheyeva N., Zrazhevskaya G., Flessa H.* Storage and mobility of black carbon in permafrost soils of the forest tundra ecotone in Northern Siberia // *Global Change Biology*. 2008. V. 14. P. 1367–1381.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01568.x>
- Gustafsson Ö., Bucheli T.D., Kukulska Z., Andersson M., Largeau C., Rouzaud J.-N., Reddy C.M., Eglinton T.I.* Evaluation of a protocol for the quantification of black carbon in sediments // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. № 15. P. 881–890.
<https://doi.org/10.1029/2000GB001380>
- Gustafsson Ö., Haghseta F., Chan C., MacFarlane J., Gschwend P.M.* Quantification of the Dilute Sedimentary Soot Phase: Implications for PAH Speciation and Bioavailability // *Environmental Science & Technology*. 1997. V. 31. P. 203–209.
<https://doi.org/10.1021/es960317s>
- Hammes K., Schmidt M.W.I., Smernik R.J., Currie L. a., Ball W.P., Nguyen T.H., Louchouart P., Houel S., Gustafsson Ö., Elmquist M., Cornelissen G., Skjemstad J.O., Masiello C.A., Song J., Peng P., Mitra S., Dunn J.C., Hatcher P.G., Hockaday W.C., Smith D.M., Hartkopf-Fröder C., Böhmer A., Lüer B., Huebert B.J., Amelung W., Brodowski S., Huang L., Zhang W., Gschwend P.M., Flores-Cervantes D.X., Largeau C., Rouzaud J.-N., Rumpel C., Guggenberger G., Kaiser K., Rodionov A., Gonzalez-Vila F.J., Gonzalez-Perez J.A., de la Rosa J.M., Manning D.A.C., López-Capél E., Ding L.* Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 21. № 3. GB3016.
<https://doi.org/10.1029/2006GB002914>
- Huang W., Hu Y., Chang Y., Liu M., Li Y., Ren B., Shi S.* Effects of Fire Severity and Topography on Soil Black Carbon Accumulation in Boreal Forest of Northeast China // *Forests*. V. 9. P. 408.
<https://doi.org/10.3390/f9070408>
- Kasin I., Ohlson M.* An experimental study of charcoal degradation in a boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. V. 65. P. 39–49.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.05.005>
- Kurth V.J., MacKenzie M.D., DeLuca T.H.* Estimating charcoal content in forest mineral soils // *Geoderma*. 2006. V. 137. P. 135–139.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.003>
- Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling // *Soil Biology and Biochemistry*. V. 41. P. 210–219.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.10.016>
- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D.* Biochar effects on soil biota - A review // *Soil Biology and Biochemistry*. V. 43. P. 1812–1836.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Li Y., Hu S., Chen J., Müller K., Fu W., Lin Z., Wang H.* Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review // *J. Soils and Sediments*. 2018. V. 18. № 2. P. 546–563.
<https://doi.org/10.1007/s11368-017-1906-y>
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G.* Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils // *Soil Science Society of America J.* 2006. V. 70. P. 1719–1730.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- Maestrini B., Miesel J.R.* Modification of the weak nitric acid digestion method for the quantification of black carbon in organic matrices // *Organic Geochemistry*. 2017. V. 103. P. 136–139.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.10.010>
- Makoto K., Hirobe M., DeLuca T.H., Bryanin S. V., Procopchuk V.F., Koike T.* Effects of fire-derived charcoal on soil properties and seedling regeneration in a recently burned *Larix gmelinii*/*Pinus sylvestris* forest // *J. Soils and Sediments*. 2011. V. 11. № 8. P. 1317–1322.
<https://doi.org/10.1007/s11368-011-0424-6>
- Makoto K., Koike T.* Charcoal ecology: Its function as a hub for plant succession and soil nutrient cycling in boreal forests // *Ecological Research*. 2011. V. 36. P. 4–12.
<https://doi.org/10.1111/1440-1703.12179>
- Masiello C.A.* New directions in black carbon organic geochemistry // *Marine Chemistry*. 2004. V. 92. P. 201–213.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.043>
- Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Ffolliott P.F.* Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis // *Forest Ecology and Management*. 1999. V. 122. P. 51–71.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00032-8)
- Nguyen T.H., Brown R.A., Ball W.P.* An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel

- soot, wood char, and sediment // *Organic Geochemistry*. V. 35. № 3. P. 217–234.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2003.09.005>
- Ohlson M., Dahlberg B., Økland T., Brown K.J., Halvorsen R.* The charcoal carbon pool in boreal forest soils // *Nature Geoscience*. 2009. V. 2. № 10. P. 692–695.
<https://doi.org/10.1038/ngeo617>
- Preston C.M., Bhatti J.S., Flanagan L.B., Norris C.* Stocks, Chemistry, and Sensitivity to Climate Change of Dead Organic Matter Along the Canadian Boreal Forest Transect Case Study // *Climatic Change*. V. 74. P. 223–251.
<https://doi.org/10.1007/s10584-006-0466-8>
- Preston C.M., Schmidt M.W.I.* Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions // *Biogeosciences*. 2006. V. 3. № 4. P. 397–420.
<https://doi.org/10.5194/bg-3-397-2006>
- Procopchuk V.F., Bryanin S.V.* Ecological stability of brown raw-humus taiga soil and relation to anthropogenic influences in the northern part of the Amur region // *Eurasian J. Forest Research*. 2007. V. 10. P. 85–88.
- R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020. <https://www.R-project.org/> (дата обращения 15.11.2021)
- Santín C., Doerr S.H., Preston C.M., González-Rodríguez G.* Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle // *Global Change Biology*. 2015. V. 21. P. 1621–1633.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12800>
- Santos F., Wagner S., Rothstein D., Jaffe R., Miesel J.R.* Impact of a Historical Fire Event on Pyrogenic Carbon Stocks and Dissolved Pyrogenic Carbon in Spodosols in Northern Michigan // *Frontiers in Earth Science*. 2017. V. 5. P. 80.
<https://doi.org/10.3389/feart.2017.00080>
- Sato H., Kobayashi H., Iwahana G., Ohta T.* Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends // *Ecology and Evolution*. 2016. V. 6. № 16. P. 5690–5704.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2285>
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F.* Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. № 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Czimeczik C.I., Glaser B., Prentice K.M., Gelinás Y., Kuhlbusch T.A.J.* Comparative analysis of black carbon in soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. V. 15. № 1. P. 163–167.
<https://doi.org/10.1029/2000GB001284>
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Gehrte E., Kögel-Knabner I., Kögel-Knabner I.* Charred organic carbon in German chernozemic soils // *European J. Soil Science*. 1999. V. 50. P. 351–365.

Pyrogenic Carbon Pools of the Upper Amur Region

S. V. Bryanin¹*, A. V. Danilov¹, Ye. S. Susloparova¹, and A. V. Ivanov¹

¹*Institute of geology and environmental management of the Far East Branch of the RAS, Ryolochniy ln., 1, Blagoveshchensk, 675000 Russia*

*E-mail: bruanin@gmail.com

Study relevance. Russian forests have the largest pool of carbon C among terrestrial ecosystems and are subject to periodic fires. Combustion products remain in soils for thousands of years and nowadays are the longest-term pool of carbon. However, the size of this pool in soils still remains a gap in knowledge about the C reserves structure in Russian forests. **Study objectives.** To determine the content and structure of pools of total and highly-stable forms of pyrogenic C (PyC), to estimate the share of various PyC forms within the soil C, and to study the relationship between the PyC and the stand characteristics and soil properties of periodically burning larch forests of the Upper Amur region. **Study objects and methods.** The paper presents the data of the first field assessment of the total and highly-stable forms of pyrogenic C pools in the soils of regularly burning larch forests of the Upper Amur region along a 500 km transect from north to south. We studied the general and stable forms of pyrogenic carbon, determined the reserves and thickness of litter, soil density, moisture, pH, Corg, N. **Study results.** In the upper soil layer, the total concentration of PyC varies from 1 to 2.2%, and the stock reaches 3.3 t ha⁻¹. The share of total PyC in the soil organic C pool reaches 21%, while the share of highly-resistant PyC forms does not exceed 4%. Principal component analysis revealed that the concentration and stock of total PyC in soils do not depend on soil properties, but tend to increase towards the north. At the same time, the content and reserves of highly-stable forms of PyC, which are signs of high-intensity fires occurring on the sites, positively and significantly correlate with the share of larch in the forest stand. **Conclusions.** Our results indicate the predominance of low-intensity ground fires, in which a large number of highly stable forms of PyC aren't being formed. The fires strength is likely to correlate positively with the larch regrowth.

Keywords: forest fires, pyrogenic carbon, forest soils, larch forests, Far East.

Acknowledgements: The study has been carried out with the financial support of RFBR, project 19-05-00305.

REFERENCES

- Abney R.B., Jin L., Berhe A.A., Soil properties and combustion temperature: Controls on the decomposition rate of pyrogenic organic matter, *Catena*, 2019, No. 182, pp. 104127. doi 10.1016/j.catena.2019.104127
- Bird M.I., McBeath A. V., Ascough P.L., Levchenko V.A., Wurster C.M., Munksgaard N.C., Smernik R.J., Williams A., Loss and gain of carbon during char degradation, *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, No. 106, pp. 80–89. doi 10.1016/j.soilbio.2016.12.012
- Bird M.I., Wynn J.G., Saiz G., Wurster C.M., McBeath A., The Pyrogenic Carbon Cycle, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, Vol. 43, pp. 273–298. doi 10.1146/annurev-earth-060614-105038
- Brodowski S., Rodionov A., Haumaier L., Glaser B., Amelung W., Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids, *Organic Geochemistry*, 2005, Vol. 36, No. 9, pp. 1299–1310. doi 10.1016/j.orggeochem.2005.03.011
- Certini G., Effects of fire on properties of forest soils: A review, *Oecologia*, 2005, No. 143, pp. 1–10. doi 10.1007/s00442-004-1788-8
- Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V., Zapasy ugleroda v podstilkakh lesov Rossii (The carbon reserves in litters of forests in Russia), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 114–121.
- Czimczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.D., Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests, *European J. Soil Science*, 2005, Vol. 56, No. 3, pp. 417–428. doi 10.1111/j.1365-2389.2004.00665.x
- DeLuca T.H., Gundale M.J., Brimmer R.J., Gao S., Pyrogenic Carbon Generation From Fire and Forest Restoration Treatments, *Frontiers in Forests and Global Change*, 2020, No. 3, pp. 1–8. doi 10.3389/ffgc.2020.00024
- Dixon R.K., Solomon A.M., Brown S., Houghton R.A., Trexler M.C., Wisniewski J., Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems, *Science*, 1994, Vol. 263, No. 5144, pp. 185–190. doi 10.1126/science.263.5144.185
- Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Payusova I.V., Gabov D.N., Donnerkhak O., Sravnenie metodov opredeleniya soedinenii ugleroda pirogenno izmenennykh organicheskikh soedinenii (Comparison of methods for determining pyrogenically modified carbon compounds), *Pochvovedenie*, 2021, No. 11, pp. 1332–1345. DOI 1310.31857/s0032180x2111006x.
- Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Y., Valdes-Korovkin I.A., Farkhodov Y.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Guggenberger G., Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (Subpolar Ural, Russia), *Geoderma*, 2021, Vol. 404, No. 115278, pp. 1–10. doi 10.1016/j.geoderma.2021.115278
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Boreal forest health and global change, *Science*, 2015, Vol. 349, No. 6250, pp. 819–822. doi 10.1126/science.aaa9092
- Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J., Almendros G., Knicker H., The effect of fire on soil organic matter – a review, *Environment International*, 2004, No. 30, pp. 855–870. doi 10.1016/j.envint.2004.02.003
- Guggenberger G., Rodionov A., Shibistova O., Grabe M., Kasansky O.A., Fuchs H., Mikheyeva N., Zrazhevskaya G., Flessa H., Storage and mobility of black carbon in permafrost soils of the forest tundra ecotone in Northern Siberia, *Global Change Biology*, 2008, Vol. 14, pp. 1367–1381. doi 10.1111/j.1365-2486.2008.01568.x
- Gustafsson Ö., Bucheli T.D., Kukulska Z., Andersson M., Largeau C., Rouzaud J.-N., Reddy C.M., Eglinton T.I., Evaluation of a protocol for the quantification of black carbon in sediments, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, No. 15, pp. 881–890. doi 10.1029/2000GB001380
- Gustafsson Ö., Haghseta F., Chan C., MacFarlane J., Gschwend P.M., Quantification of the Dilute Sedimentary Soot Phase: Implications for PAH Speciation and Bioavailability, *Environmental Science & Technology*, 1997, Vol. 31, pp. 203–209. doi 10.1021/es960317s
- Hammes K., Schmidt M.W.I., Smernik R.J., Currie L. a., Ball W.P., Nguyen T.H., Louchouart P., Houel S., Gustafsson Ö., Elmquist M., Cornelissen G., Skjemstad J.O., Masiello C.A., Song J., Peng P., Mitra S., Dunn J.C., Hatcher P.G., Hockaday W.C., Smith D.M., Hartkopf-Fröder C., Böhmer A., Luer B., Huebert B.J., Amelung W., Brodowski S., Huang L., Zhang W., Gschwend P.M., Flores-Cervantes D.X., Largeau C., Rouzaud J.-N., Rumpel C., Guggenberger G., Kaiser K., Rodionov A., Gonzalez-Vila F.J., Gonzalez-Perez J.A., de la Rosa J.M., Manning D.A.C., López-Capél E., Ding L., Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 21, No. 3, GB3016. doi 10.1029/2006GB002914
- Huang W., Hu Y., Chang Y., Liu M., Li Y., Ren B., Shi S., Effects of Fire Severity and Topography on Soil Black Carbon Accumulation in Boreal Forest of Northeast China, *Forests*, Vol. 9, pp. 408. doi 10.3390/f9070408
- Ivanov A.V., Lynov D.V., Panfilova E.V., Braun M., Zamolodchikov D.G., Forest litters as a link in the carbon cycle in coniferous–broadleaved forests of the Southern Far East of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 10, pp. 1164–1171. DOI 1110.1134/S1064229318100058.
- Kasin I., Ohlson M., An experimental study of charcoal degradation in a boreal forest, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 65, pp. 39–49. doi 10.1016/j.soilbio.2013.05.005
- Krasnoshchekov Y.N., Vliyanie pirogenogo faktora na serogumusovye pochvy osnovnykh lesov v tsentral'noi ekologicheskoi zone baikal'skoi prirodnoi territorii (Pyrogenic impact on gray humus soils of pine forests in the central ecological zone of the Baikal lake natural territory), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 2, pp. 43–52.
- Kurth V.J., MacKenzie M.D., DeLuca T.H., Estimating charcoal content in forest mineral soils, *Geoderma*, 2006, Vol. 137, pp. 135–139. doi 10.1016/j.geoderma.2006.08.003
- Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X., Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 41, pp. 210–219. doi 10.1016/j.soilbio.2008.10.016

- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D., Biochar effects on soil biota – A review, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 43, pp. 1812–1836. doi 10.1016/j.soilbio.2011.04.022
- Li Y., Hu S., Chen J., Müller K., Fu W., Lin Z., Wang H., Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review, *J. Soils and Sediments*, 2018, Vol. 18, No. 2, pp. 546–563. doi 10.1007/s11368-017-1906-y
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G., Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils, *Soil Science Society of America J.*, 2006, Vol. 70, pp. 1719–1730. doi 10.2136/sssaj2005.0383
- Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., D.A. K., Sen'ko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo gorenii) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175. doi 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175
- Maestrini B., Miesel J.R., Modification of the weak nitric acid digestion method for the quantification of black carbon in organic matrices, *Organic Geochemistry*, 2017, Vol. 103, pp. 136–139. doi 10.1016/j.orggeochem.2016.10.010
- Makoto K., Hirobe M., DeLuca T.H., Bryanin S. V., Procopchuk V.F., Koike T., Effects of fire-derived charcoal on soil properties and seedling regeneration in a recently burned *Larix gmelinii*/*Pinus sylvestris* forest, *J. Soils and Sediments*, 2011, Vol. 11, No. 8, pp. 1317–1322. doi 10.1007/s11368-011-0424-6
- Makoto K., Koike T., Charcoal ecology: Its function as a hub for plant succession and soil nutrient cycling in boreal forests, *Ecological Research*, 2011, Vol. 36, pp. 4–12. doi 10.1111/1440-1703.12179
- Masiello C.A., New directions in black carbon organic geochemistry, *Marine Chemistry*, 2004, Vol. 92, pp. 201–213. doi 10.1016/j.marchem.2004.06.043
- Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Ffolliott P.F., Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis, *Forest Ecology and Management*, 1999, Vol. 122, pp. 51–71. doi 10.1016/S0378-1127(99)00032-8
- Nguyen T.H., Brown R.A., Ball W.P., An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, wood char, and sediment, *Organic Geochemistry*, Vol. 35, No. 3, pp. 217–234. doi 10.1016/j.orggeochem.2003.09.005
- Ohlson M., Dahlberg B., Økland T., Brown K.J., Halvorsen R., The charcoal carbon pool in boreal forest soils, *Nature Geoscience*, 2009, Vol. 2, No. 10, pp. 692–695. doi 10.1038/ngeo617
- Preston C.M., Bhatti J.S., Flanagan L.B., Norris C., Stocks, Chemistry, and Sensitivity to Climate Change of Dead Organic Matter Along the Canadian Boreal Forest Transect Case Study, *Climatic Change*, Vol. 74, pp. 223–251. doi 10.1007/s10584-006-0466-8
- Preston C.M., Schmidt M.W.I., Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions, *Biogeosciences*, 2006, Vol. 3, No. 4, pp. 397–420. doi 10.5194/bg-3-397-2006
- Procopchuk V.F., Bryanin S.V., Ecological stability of brown raw-humus taiga soil and relation to anthropogenic influences in the northern part of the Amur region, *Eurasian J. Forest Research*, 2007, Vol. 10, pp. 85–88.
- R Development Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020. <https://www.R-project.org/> (November 15, 2021)
- Santín C., Doerr S.H., Preston C.M., González-Rodríguez G., Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle, *Global Change Biology*, 2015, Vol. 21, pp. 1621–1633. doi 10.1111/gcb.12800
- Santos F., Wagner S., Rothstein D., Jaffe R., Miesel J.R., Impact of a Historical Fire Event on Pyrogenic Carbon Stocks and Dissolved Pyrogenic Carbon in Spodosols in Northern Michigan, *Frontiers in Earth Science*, 2017, Vol. 5, pp. 80. doi 10.3389/feart.2017.00080
- Sato H., Kobayashi H., Iwahana G., Ohta T., Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends, *Ecology and Evolution*, 2016, Vol. 6, No. 16, pp. 5690–5704. doi 10.1002/ece3.2285
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F., Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, No. 1. doi 10.1038/s41598-021-92152-9
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Czimeczik C.I., Glaser B., Prentice K.M., Gelin Y., Kuhlbusch T.A.J., Comparative analysis of black carbon in soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, Vol. 15, No. 1, pp. 163–167. doi 10.1029/2000GB001284
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Gehrt E., Kögel-Knabner I., Kögel-Knabner I., Charred organic carbon in German chernozemic soils, *European J. Soil Science*, 1999, Vol. 50, pp. 351–365.
- Startsev V.V., Dymov A.A., Prokushkin A.S., Soils of post-pyrogenic larch stands in Central Siberia: morphology, physicochemical properties, and specificity of soil organic matter, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 8, pp. 885–897.
- Tsibart A.S., Gennadiev A.N., The influence of fires on the properties of forest soils in the Amur River basin (the Noriskii Reserve), *Eurasian soil science*, 2008, Vol. 41, No. 7, pp. 686–693.
- Tsvetkov P.A., Pyrophytic properties of the larch *Larix gmelinii* in terms of life strategies, *Russian J. Ecology*, 2004, Vol. 35, No. 4, pp. 224–229.
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Organicheskie uglerod listvennichnykh lesov Rossii (Organic carbon of Russian larch forests), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2003, Vol. 21, No. 1, pp. 66–76.