

УДК 551.242.23

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕЛЕННОГО ПОЯСА ФЕННОСКАНДИИ И ИХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ

В. Я. Горьковец¹, Б. З. Белашев^{1, 2}

¹Институт геологии Карельского научного центра РАН

²Петрозаводский государственный университет

В статье обсуждаются особенности геологического строения территории Зеленого пояса Фенноскандии и механизмы литосферно-биосферных связей с участием эндогенных флюидов и радиоактивного газа радона. Измерения объемной активности радона в геологических структурах на изучаемой территории показали, что его концентрации способны влиять на биоту. Ростовые аномалии деревьев и сосредоточенные на локальных участках крупные муравейники дают примеры такого влияния.

К л ю ч е в ы е с л о в а: геологические структуры, кристаллические породы, тектонические зоны, эндогенные флюиды, радон, аномалии роста растений, крупные муравейники.

V. Ya. Gorkovets, B. Z. Belashev. GEOLOGICAL STRUCTURES OF THE GREEN BELT OF FENNOSCANDIA AND THEIR GEOECOLOGICAL ROLE

The features of geological structures of the Fennoscandian Green Belt areas and the mechanisms of the lithosphere-biosphere links, involving endogenous fluids and the radioactive gas radon, are discussed. The measurements of radon volume activity, carried out in the geological structures in the study area, showed that a sufficient radon concentration is capable of influencing the biota. The examples of such influence include the anomalies of growth in the woody plants and the emergence of large anthills in the local areas.

K e y w o r d s: geological structure, crystalline rocks, tectonic zones, endogenous fluids, radon, growth anomalies in plants, large anthills.

Введение

Вытянутый вдоль российско-финской и российско-норвежской границ от Баренцева до Балтийского моря, Зеленый пояс Фенноскандии (ЗПФ) включает охраняемые природные территории федерального и регионального подчинения, связанные с пан-европейской экологической сетью Natura 2000 и охраняемыми территориями Норвегии. С российской стороны элементами этого природоохранного кластера являются заповедники «Пасвик», «Лапландский», «Кос-

томукшский», «Кутса», национальные парки «Паанаярви», «Калевальский», находящийся в стадии становления парк «Ладожские шхеры». Проектируются новые охраняемые территории «Койтайоки», «Толвоярви», «Тулос», «Карельский лес», «Приграничный», «Ингерманландский», «Исо-Ийярви». Многочисленные охраняемые участки экосистем созданы в приграничной полосе Финляндии: «Jortanansalo», «Lapinsuo», «Lentua», «Elumejssalo», «Ulinsalo», «Jso-Palonen», «Valtimo», «Maariansarkat» и другие [Титов и др., 2009].

Проект «Зеленый пояс Фенноскандии» ориентируется на сохранение и освоение ресурсов приграничного района, рассматриваемого в качестве резерва территорий, лесных ресурсов, полезных ископаемых, производителя кислорода и регулятора водного режима. Уязвимость северной природы требует рационального планирования хозяйственной деятельности, сохранения чистоты водоемов, воздуха, поддержания биоразнообразия. Важной составляющей проекта является отработка и согласование природоохранных стратегий с социально-экономическими и культурными инициативами развития территории, подходов, апробирующих научные идеи и их последующее закрепление в межгосударственных, федеральных и межрегиональных документах [Hokkanen et al., 2006].

Главной ценностью территории ЗПФ считают зональные экосистемы, сменяющие друг друга с севера на юг. Особое значение придается сохранившимся популяциям европейских реликтовых лесов [Государственный доклад..., 2007]. Предметом нашего исследования являются геологические структуры, также имеющие научное и практическое значение. С экономической точки зрения эти структуры интересны прежде всего наличием месторождений полезных ископаемых.

Кристаллические образования докембрия Фенноскандинавского щита, перекрытые маломощными четвертичными отложениями, находят применение при реконструкции геологической истории с возраста 3,2 млрд лет. О проявлениях тектоники свидетельствуют длительно сохраняющие активность глубокофокусные полихронные тектонические зоны и разломы земной коры. Поздний этап геологической истории щита определил ледник, деградировавший около 3 тыс. лет назад и сформировавший своеобразный ландшафт с многочисленными озерами, реками, болотами и моренными отложениями. Современное медленное поднятие щита считают следствием его освобождения от ледового покрова.

В ходе исследований, проводимых по обе стороны российско-финской границы в течение более 20 лет, установлены границы геологических объектов, их возраст, состав, строение, структурно-формационная принадлежность, минерагеническая специфика и особенности геологических процессов.

В функционировании экосистем роль геологических структур недооценивают, хотя именно они обеспечивают живым организмам механическую опору, тепловой режим и субстрат, необходимый для жизни.

Цель данной статьи – рассмотреть геологические структуры Зеленого пояса Фенноскандии с позиций геоэкологии, обсудить возможные литосферно-биосферные связи, их механизмы, свойства тектонических зон и эндогенных флюидов. Главная роль в таком подходе отведена эндогенным флюидам, поднимающимся по тектоническим зонам и являющимся агентами межгеосферных взаимодействий. Распространяясь от границ ядра через мантию, в земной коре эти флюиды формируют месторождения полезных ископаемых, а при выходе на поверхность изменяют свойства атмосферы, гидросферы, активно воздействуют на биоту [Экологические функции..., 2000].

Изученность геологического строения, минерагении и границ ЗПФ

Детальное описание геологических структур Зеленого пояса Фенноскандии на территории Республики Карелия дано в работе [Горьковец, Раевская, 2009].

Район наших исследований (рис. 1) имеет протяженность 300 км, ширину 60–150 км и занимает восточную часть Карельского кратона в западной части Карелии и восточной части Финляндии. Расположенная на возвышенности Маанселькя, на юго-востоке переходящая в Западно-Карельскую возвышенность, эта территория представляет водораздел как Белого моря, так и Ботнического залива.

Кристаллический фундамент пояса сложен древними архейскими комплексами и протерозойскими толщами, перекрытыми плащом четвертичных отложений (см. рис. 1).

Раннедокембрийские комплексы пояса делят на структурные этажи. Глубинный этаж занимает гнейсовый и гнейсо-гранитоидный комплекс раннего архея, по возрасту 3,5 млрд лет относимый к саамию, преобразованный процессами мигматизации и гранитообразования. Проявлением этого уровня являются саамские толщи Вокнаволоцкого блока, прослеженные от оз. Верхнее Куйто до северной части заповедника «Костомукшский», содержащие архейские интенсивно переработанные супракрустальные комплексы с реликтами гранулитовой фации метаморфизма: слюдистые гнейсы – биотитовые, гранат-мусковит-биотитовые, амфибол-биотитовые, гранат-силлиманит-двуслюдяные гнейсы; амфибол- и пироксенсодержащие, двупироксеновые амфиболиты и гнейсы, эндербиты. Часть блока сложена инфракрустальными комплексами: гнейсо-гранодиоритами, плагиогнейсогранитами, тоналито-

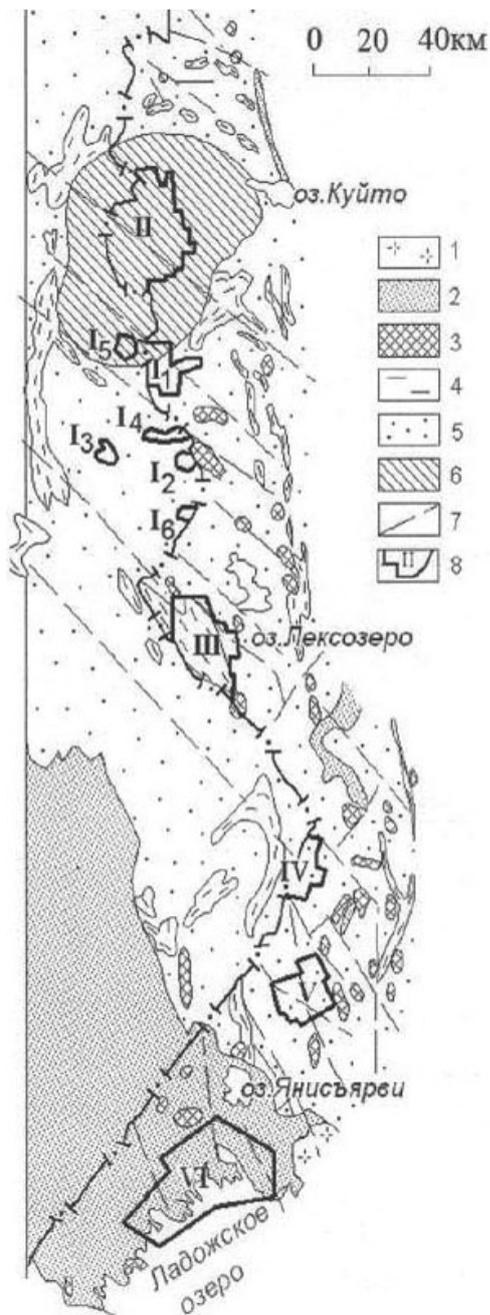


Рис. 1. Схема геологического строения исследуемой области Зеленого пояса Фенноскандии:

1 – граниты рапакиви; 2 – нижнекарельские толщи: конгломераты, песчаники, сланцы, метабазалты; 3 – плагио-микроклиновые и микроклиновые граниты; 4 – позднеархейские супракрустальные толщи по метаосадкам (биотитовые и амфиболовые сланцы) и вулканитам основного, ультраосновного, среднего и кислого составов, железистые кварциты; 5 – гнейсо-граниты, диориты, мигматиты, тоналиты; 6 – слюдястые и амфиболовые гнейсы, гранулиты, эндербиты; 7 – тектонические зоны; 8 – контуры действующих (НП), проектируемых (ПНП) и охраняемых территорий (ОТ): Национальный парк «Дружба» (I); заповедник «Костомукшский» (I₁); охраняемые территории: Элюмиссало (I₂), Лентуа (I₃), Исо-Палонен (I₄), Йортанансало-Лапинсуо (I₅), Улвинсало (I₆); НП «Калевальский» (II); ПНП «Тулос» (III); ПНП «Койтайоки» (IV); ПНП «Толвоярви» (V); ПНП «Ладожские шхеры» (VI)

гнейсами, плагио-микроклиновыми, микроклиновыми, амфибол- и гиперстенсодержащими гранитами-чарнокитами [Лазарев, 1971; Свириденко, 1974; Горьковец, Раевская, 2004, 2005; Горьковец и др., 2011].

Следующий структурный уровень составляют супракрустальные кристаллические образования и гранитоидные комплексы позднего архея, представленные зеленокаменными поясами, слагающими обширные площади гранитоидными породами и полями нерасчлененных архейских мигматитов с возрастом 2,95–2,65 млрд лет. Реликты лопийской подвижной области, эти фрагменты были изменены в результате де-

формаций, метаморфизма, метасоматоза и денудации, как, например, зеленокаменные пояса Костомукшский, Кухмо-Суомуссалми, Типасъярви, Иломантси, Совдозеро, образовавшиеся при разных геодинамических условиях, имеющие характерные структурный рисунок, формационный вещественный состав и металлогеническую специализацию.

Последний этаж принадлежит супракрустальным толщам раннего протерозоя. Образования этого яруса возрастом менее 2,45 млрд лет относят к нижнепротерозойским комплексам стратифицированных сариолийских и свекофеннских образований с дайками основного,

ультраосновного-щелочного, ультраосновного состава, селецкими гранитами и батолитами рапакивиподобных гранитов. Их рассматривают как тектонические депрессии, сдвиговые грабены, структуры «pull-apart» [Mann et al., 1982], выделяя в них вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные терригенные компоненты. Вулканогенные и вулканогенно-осадочные компоненты представляют коматиитовые и высокомагнезиальные базальты, андезибазальные базальты и андезиты, слюдястые туфы и туффиты основного (базальтового) состава. Часто вулканогенно-осадочные образования с несогласием залегают на ранне- и позднеархейском гранито-гнейсовом фундаменте – гранито-гнейсах, мигматитах, гнейсо-гранодиоритах, тоналитах. Осадочные толщи содержат слоистые образования конгломерато-брекчии, аркозовых, полимиктовых конгломератов, аркозовых песчаников. В составе обломков этих конгломератов преобладают гранитоидные обломки фундамента. Примерами образований этого яруса являются карельский комплекс стратифицированных сариолийских структур Саари-Киекки, Лубосалмской, Мотко, свекофеннский – структур Приладожья. Сариолийские образования структур представлены крупногалечными, валунными гранитными конгломератами и конгломерато-брекчиями, состав которых отвечает подстилающим гранитоидам, а также грубозернистыми аркозовыми и крупнозернистыми песчаниками. Мощность грубообломочных терригенных сариолийских толщ составляет сотни метров. Среди протерозойских интрузивных образований на исследуемой территории выделяются батолитовые тела щелочных рапакивиподобных гранитов. Рапакивиподобные граниты часто прорывают архейский гнейсогранитный и гнейсо-тоналитовый фундаменты.

Разрывные нарушения на территории Зеленого пояса имеют возраст от древних архейских до современных неотектонических подвижек. Как правило, это дислокации северо-восточного, северо-западного и субширотного направлений. Большая их часть представлена глубинными разломами, трассируемыми телами интрузивных пород. В ряде мест интенсивные тектонические движения образовали сеть пересекающихся разломов разного возраста и направлений, отчетливо выраженную в рельефе местности, в морфологии озерных котловин и речных долин.

Минерагеническая спецификация геологических структур показана на рис. 2. Продуктивными геологическими структурами являются позднеархейские зеленокаменные пояса, на-

пример пояса Костомукшский и Кухмо-Суомусалми, оконтуривающие Вокнаволоцкий блок. К Костомукшскому поясу относится крупнейшее на Фенноскандинавском щите железорудное месторождение с запасами 1,04 % от запасов железных руд месторождений мира. Руды месторождения пригодны для бездомной металлургии и производства сверхчистых сталей. В поясе Кухмо-Суомусалми железные руды являются маломощными, но обнаружены золото и лампроиты.

Положение и продуктивность зеленокаменных поясов в ходе протерозойской тектономагматической активизации определила подвижная глубинно-проницаемая зона шириной 10–15 км на границе с Вокнаволоцким блоком. Золоторудные проявления и месторождения этой зоны относят к золото-сульфидно-кварцевому типу месторождений, характерному для зеленокаменных поясов. Оторванное от отложения позднеархейских супракрустальных толщ, образование золотых руд проходило в два этапа тектономагматической активизации и было связано с регенерацией и переотложением рудного вещества вмещающих комплексов при участии глубинных гидротермальных растворов. Этап, отвечающий золото-кварцевому и золото-пирит-кварцевому типу оруденения, ассоциированный с гранитоидами (2,65 млрд лет), контролировался субмеридиональными разломами глубинного заложения. Второй, более продуктивный этап формирования (1,23 млрд лет), представленный золото-арсенипирит-кварцевым типом оруденения, был связан с раннепротерозойскими селецкими микроклиновыми и рапакивиподобными щелочными гранитами возраста 2,45 млрд лет и контролировался региональными тектоническими зонами СЗ 310° простираения. Золото рудопроявления Луупенсуо в Костомукшском рудном поле высокопробное, свободное, легкообогащаемое. Размер его золотин оценивается от 10 до 250 мкм (средних 42 мкм). Прогнозные ресурсы золота по категории Р1 могут составить 125 т [Горьковец и др., 2007].

В Костомукшском рудном поле выявлены более 100 даек лампроитов различного минерального состава и диатремы кимберлитов II группы (оранжеитов). Кусты диатрем приурочены к узлам пересечения и сочленения сопоставимых по рангу мантийных субширотных диагональных СЗ 300–310° и дуговых тектонических разломных зон глубинного заложения. Стволовые высокопроницаемые участки провоцирует внедрение в земную кору мантийного вещества. Диатремы сложены эксплозивными брекчиями с обломками грацбургитов-дунитов

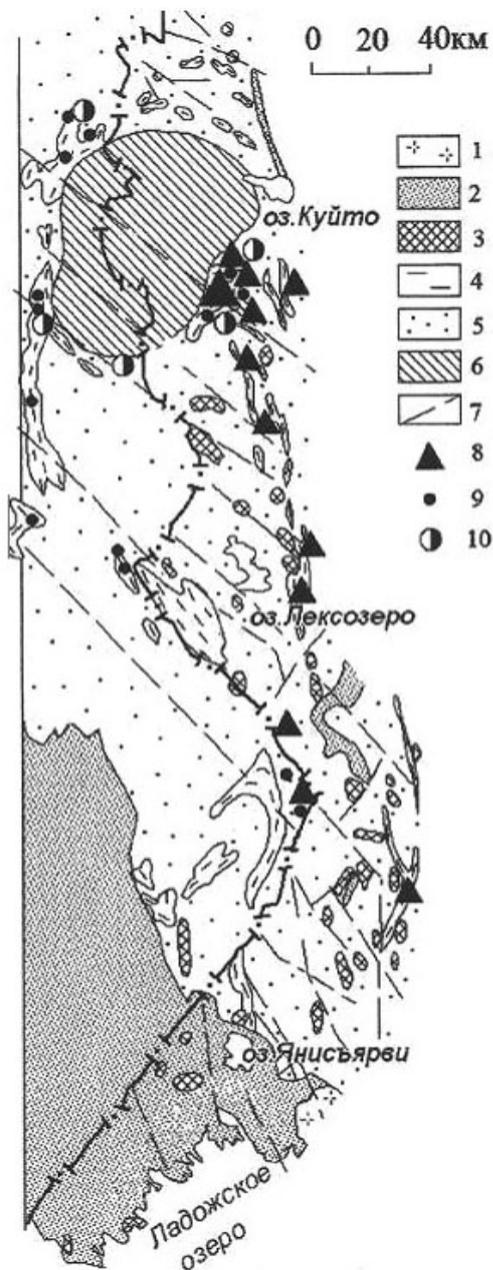


Рис. 2. Минерагеническая схема исследуемой области Зеленого пояса Фенноскандии:

1 – граниты рапакиви; 2 – нижнекарельские толщи: конгломераты, песчаники, сланцы, метабазалты; 3 – плагио-микроклиновые и микроклиновые граниты; 4 – позднеархейские супракрупальные: толщи по метаосадкам (биотитовые, амфиболовые сланцы) и вулканитам основного, ультраосновного, среднего и кислого составов, железистые кварциты; 5 – гнейсограниты, диориты, мигматиты, тоналиты; 6 – слюдястые и амфиболовые гнейсы, гранулиты, эндербиты; 7 – тектонические дислокации; 8 – месторождения железа; 9 – рудопроявления золота; 10 – алмазоносные кимберлиты и лампроиты

0,1–10 см в поперечнике и амфиболовых сланцев по базальтам контоксской серии, содержат пироп, шпинель, хромдиопсид, пикроильменит, хромпикотит, хромит, апатит, Sr-apatит, тетраферрифлогопит, рутил, другие минералы. Основная масса оранжеев представлена флогопитом, оливином. Обломки имеют округлую, овальную форму. Количество обломков достигает 50 %. Из оранжеев Костомукшского рудного района выделены десять бесцветных кристаллов алмазов тетраэдрической и октаэдрической формы размером 0,8–1,5 мм [Горьковец и др., 2013].

Для планирования охранной и хозяйственной деятельности в пределах Зеленого пояса

Фенноскандии как целостного природно-экономического домена приоритетным является определение его границ. Первоначально ширину пояса оценивали в соответствии с размером приграничной полосы – 50 км. Ориентация территории на развитие туризма вызвала предложение совместить его границы с границами административно-территориального деления. Формальные попытки проведения границ пояса не учитывают связь его охраняемых территорий с прилежащими районами и акваториями.

Согласно биогеографическому подходу границами пояса следует считать берега рек и озер [Крышень и др., 2013]. С позиций геоло-

гии такой подход вполне адекватен, поскольку речная и озерная сеть, проходя по тектоническим зонам, естественным образом выделяет геологические структуры Зеленого пояса Фенноскандии.

Эндогенные флюиды и тектонические зоны

Тектонические зоны представляют участки сдвиговых дислокаций земной коры. Подвижность, проницаемость и делимость литосферы делает их областями деформаций, накопления и преобразования вещества. К ним приурочены аномалии геофизических полей, магнитотеллурические токи, плазменные образования, геохимические особенности, повышенный тепловой поток и радиоактивность. В узлах пересечения тектонических зон фиксируют участки загрязнения почв, гибели рыб и морских звезд, дихотомии и других аномалий роста деревьев, вариабельность атмосферных показателей и возмущений атмосферного электрического поля [Кутинов, Чистова, 2010]. Многие механические, тепловые и вещественные свойства тектонических зон объясняют разгрузкой в них эндогенных флюидов [Енгальчев, 2011]. Среди известных эндогенных флюидов – водорода, метана, диоксидов углерода и серы, азота и других – во многих отношениях интересен тяжелый инертный газ радон, не имеющий цвета, запаха, растворимый в воде и переносимый водными потоками на значительные расстояния. Благодаря радиоактивности радон легко обнаружить. Он несет сведения о напряженном состоянии и геодинамике горных массивов, является предвестником землетрясений, оказывает влияние на биосферу и здоровье людей. Изотопы радона дают начало цепочкам новых распадов с образованием α , β , γ частиц и долгоживущих дочерних радионуклидов, в частности изотопов по-

лония и висмута [Бекман, 2001]. Опасность облучения населения от радона и продуктов его распада, по данным ООН, составляет 43 % [Ионизирующие излучения..., 1988]. Для территории ЗПФ с массивами горных пород на дневной поверхности, активными тектоническими зонами, месторождениями полезных ископаемых, развивающейся горно-добывающей промышленностью мониторинг радона особенно актуален.

Задачей наших исследований было определение объемной активности радона в активных тектонических зонах разновозрастных докембрийских геологических структур. Исследования на территории Зеленого пояса Фенноскандии со стороны Карелии и Финляндии и на прилегающих территориях были проведены в 2011–2013 гг. Раннеархейские комплексы с возрастом 3,5 млрд лет изучали на гранулитовых комплексах Вокнаволоцкого блока в районе деревни Вокнаволок (Западная Карелия), а позднеархейские кристаллические образования (2,75–2,8 млрд лет) – в Костомукшском рудном поле (Западная Карелия) и в районе Иломанси (Финляндия). Позднепротерозойские геологические структуры с возрастом 1,9–2,1 млрд лет обследовали на территории Финляндии, непосредственно прилегающей к Зеленому поясу Фенноскандии, в сланцевых зонах месторождений Оутокумпу и Полвьярви.

Измерения концентрации подпочвенного радона вели сейсмической радоновой станцией «СРС-05» [«СРС-05»] и индикаторами-детекторами радона «Сирад MR 106 N» [Детектор-индикатор...]. Станция «СРС-05» предназначена для длительной автономной работы, измерения объемной активности радона и торона, параметров среды – давления, температуры, влажности – и сохранения полученных данных во внутренней памяти прибора. Места установки закапываемых в землю детекторов

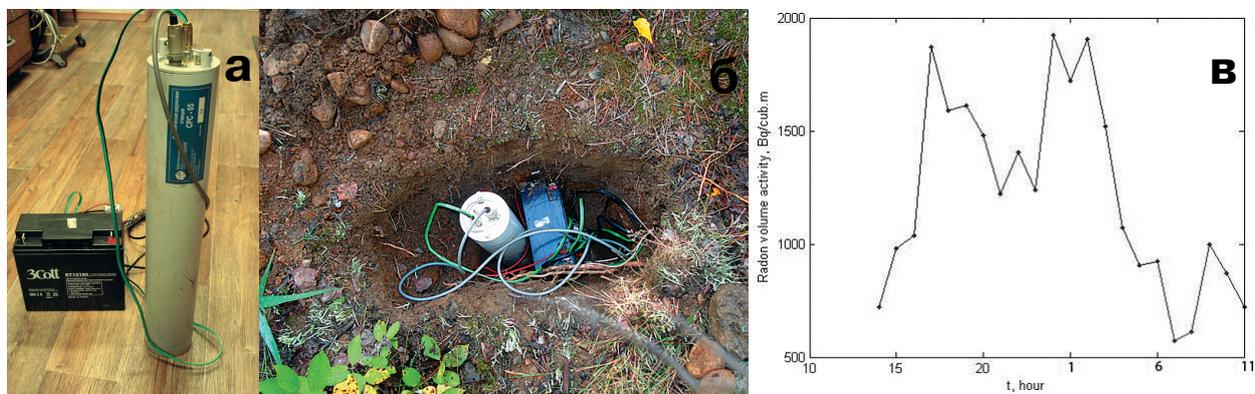


Рис. 3. Сейсмическая радоновая станция «СРС-05» в нерабочем (а) и рабочем (б) состояниях. Ход объемной активности радона в зоне месторождения Оутокумпу (Финляндия) (в)



Рис. 4. Структурные аномалии сосен: а – дихотомия (Иломанси), б – наросты (Оутокумпу), в – многоствольность (Вокнаволк)

радона определяли по показаниям водородного сенсора газоанализатора «Драгер Х - am 5000» [Drager X-am 5000]. Радиоактивный гамма-фон на поверхности измеряли сцинтилляционным радиометром «СРП-68» [Радиометр «СРП-68»]. Сейсмическая радоновая станция «СРС-05» и результаты измерения ею объемной активности радона показаны на рис. 3. Цикличность суточного хода концентрации радона вызывают приливные литосферные волны.

Каналы разгрузки радона связаны с разновозрастными активными зонами разломов, фиксируемыми по эманациям легких эндогенных газов. Наибольшая объемная активность радона 14 кБк/м^3 обнаружена в позднеархейских геологических структурах, сложенных содержащими уран микроклиновыми гранитами. Для позднепротерозойских образований объемная активность радона зафиксирована в интервале $2\text{--}4 \text{ кБк/м}^3$, для раннеархейских породных типов – на уровне 1 кБк/м^3 . При этом радиационный гамма-фон не свидетельствует о повышенных концентрациях подпочвенных радиоактивных газов.

Полученные результаты будут уточняться с увеличением числа наблюдений.

Аномалии роста деревьев тектонических зон

Растения, и прежде всего древесные формы, развивающиеся на одном месте десятки и сотни лет, являются индикаторами влияния факторов тектонических зон на биологические объекты. О чувствительности деревьев к этим факторам свидетельствуют четко выраженные на космических снимках полосы зон разломов, отражающие смену состава растительности

даже при мощном чехле четвертичных отложений [Спутниковые технологии..., 2010].

Основную радиационную нагрузку на растения в тектонических зонах дает радон. Поступая в растение с водой через корни, он вместе с дочерними продуктами распада подвергает растение внутреннему облучению. Такое облучение оказывается эффективным благодаря способности радионуклидов избирательно накапливаться в тканях растения и разрушать клеточные структуры за счет альфа-, бета- и гамма-излучений, в частности, за счет радионуклидов больших периодов полураспада, практически не выводящихся из тканей. Результатом облучения являются выраженные эффекты радиационной стимуляции, морфологических и генетических изменений, лучевой болезни, старения, снижения продолжительности жизни и гибели. Особенно велик риск внутреннего облучения у многолетних растений.

Типичными аномалиями деревьев в тектонических зонах являются разнообразие форм, многоствольность, дихотомия, наросты, свилеватость, закрученность стволов и ветвей. Структурные аномалии сосен на территории Зеленого пояса Фенноскандии и в прилегающих районах представлены на рис. 4.

Вариабельность признаков полиморфизма в пределах зон разломов характерна для берез повислой (*Betula pendula*), Литвинова (*B. litwinowii*) и Радде (*B. raddeana*), клена Траутфеттера (*Acer trautvetteri*), бука восточного (*Fagus orientalis*), сосны Коха (*Pinus kochiana*). Заметен рост числа особей измененного фенотипа и количества стволов в клоне по мере приближения к линиям разрывных нарушений, дайкам, интрузиям, узлам пересечения поверхностных и глубинных разломов

[Шиманская и др., 2013]. Индикатором цитогенетических аномалий соматических клеток, подвергшихся действию мутагенов разной природы: α -, β -, γ -, УФ, рентгеновских излучений, химических веществ (бензол, бензапирен, выхлопные газы, колхицин, колцемид и др.), вирусов, гипо- и гидротермии, являются дополнительные ядрышки в клетках растений. Дополнительные ядрышки обнаружены у традесканции и зебрины повислой в зонах разгрузки радона с объемной активностью 200–400 Бк/м³ [Калаев и др., 2001]. Исследования в этом направлении позволили развить гипотезу о радиационном происхождении карельской березы [Белашев, Болондинский, 2013].

Помимо причин, вызывающих мутации, значимую роль в жизни биосферы играют факторы, обеспечивающие выживание мутантов. Из-за многоуровневой иерархической организации растений, проявляющей неоднозначные реакции на облучение, то, что на одном уровне считается повреждением системы, на более высоком уровне оказывается условием ее сохранности. Гибель клеток с поврежденной ДНК влечет восстановление тканей за счет полноценных клеток, благодаря чему повышается радиорезистентность растения. В случаях, когда внутриклеточные структуры предотвращают гибель клеток, в последующих делениях таких клеток появляются ошибки, нарушения генома, негативно сказывающиеся на жизненном цикле потомков. Нарушение деления клеток способствует образованию наростов. В ряду последовательных семенных генераций и в череде поколений последствия однократного острого гамма-облучения, связанные с повреждениями генома, вызывали у потомков преждевременную гибель, увеличение аномальных форм в выборках, изменчивость морфологических признаков, неоднозначные реакции на дополнительное радиационное воздействие. Многолетние растения радиоактивных участков и их семенное потомство оказываются более жизнестойкими и лучше приспособленными к среде.

Многоствольность позволяет деревьям накопить больше снега зимой, противостоять колебаниям температуры, ранним заморозкам, солнечным ожогам, вирусным заболеваниям. Общая корневая система способствует усилению фотосинтеза, питания, сохранности растения при гибели одного или нескольких стволов. Мощная крона многоствольного дерева противостоит порывам ветра, длительно сохраняет листья. С такой кроной дерево лучше готовится к зиме. Потенциалы стволов, складываясь, усиливают электрическое поле растения. За счет затенения, позднего опада листьев, сильного электрическо-

го поля многоствольное дерево успешно борется с сорняками в пределах занимаемой территории и на подступах к ней. Компактность многоствольной формы создает благоприятные условия для накопления снега зимой и насекомых-опылителей летом [Дэви, 2008].

Частным случаем многоствольности является дихотомия. При обычных условиях частота дихотомии ствола сосны не превышает 0,5–1 %. В зонах разломов она доходит до 25 %, а в их центральных частях до 60 % [Григорьев, Мирошников, 2000]. Из лиственных деревьев дихотомии и другим аномалиям в тектонических зонах наиболее подвержены березы.

Причины дихотомии и многоствольности деревьев до конца не выяснены. Их связывают с приуроченностью к тектоническим зонам, рудным месторождениям, радоновым водам. В условиях конкуренции за ресурсы дихотомия и многоствольность невыгодны. Можно предположить, что они являются результатом гормезиса – действия слабых доз радиации, инициирующих у растения реакции синтеза белков, активацию гена репарации ДНК, мембранных рецепторов, стимуляцию иммунной системы. Проявлением гормезиса считают адаптивный ответ, повышающий устойчивость биологических объектов к поражающим дозам радиации в случае их предварительного облучения слабыми дозами.

Наблюдения на озе в д. Вокнаволок, в большом количестве содержащем многоствольные и дихотомичные сосны, по-видимому, подтверждают эту точку зрения. Сформированный ледниковой рекой горизонтальный канал распространения радона способствует тому, что на поверхности концентрация радона не отличается от фоновой. Одновременные измерения, проведенные станцией «СРС-05» и индикаторами-детекторами радона «Сирад» на разных глубинах, показали, что на глубине 0,8–1 м объемная активность радона составляла 700–1000 Бк/м³, а на глубине 0,2–0,3 м являлась фоновой 50 Бк/м³.

Примером воздействия радона на биоту являются гигантские муравейники.

Гигантские муравейники

Помимо обычных муравейников высотой 0,5–0,7 м и диаметром подошвы 0,7–0,9 м на территории заповедников «Костомукшский» и «Lentua» встречаются муравейники размерами соответственно 1,7–2,0 и 2,3–2,6 м (рис. 5). Как правило, встречаются группы крупных муравейников [Higashi, Yamauchi, 1997]. Причины их появления и концентрирования на местности неизвестны.



Рис. 5. Крупный муравейник в заповеднике «Костомукшский»

Гигантский муравейник устойчив к неблагоприятным факторам среды. В нем легче поддерживать температурный режим, оплодотворять самок, воспроизводить рабочих муравьев. Часто такой муравейник состоит из нескольких гнезд. Обычно крупный муравейник заметен и привлекает разорителей. Однако разорители повторно не трогают поломанное гнездо. Восстанавливая его, муравьи демонстрируют приверженность к месту. Лесные рыжие муравьи (*Formica*) избирательно относятся к выбору места для муравейника, а при искусственном расселении не приживаются на участках, не отличающихся по таксационным параметрам [Захаров, Калинин, 2007].

Сосредоточенные на небольшой площади крупные муравейники располагаются преимущественно вдоль взаимно перпендикулярных направлений. Это указывает на связь муравейников с дислокациями земной коры тектонического происхождения.

В заповеднике «Костомукшский» на участке площадью 0,15 кв. км сосредоточено 36 крупных муравейников при отсутствии обычных. Наблюдения за ними велись в течение 17 лет. С годами количество муравейников менялось незначительно. Некоторые из них прекратили существование, другие были восстановлены, возникли новые муравейники. Участок оказался удобным для геолого-геофизического изучения: на нем были пробурены гидрологические скважины, проведена геологическая съемка.

Тектонический каркас территории заповедников «Костомукшский» и «Lentua» показан на рис. 6. Многочисленные трещины и палеодислокации образовались при подвижках Вокнаволоцкого блока. Выделенные по морфологическим признакам палеодислокации прослежены в рельефе на протяжении 20 км и надежно фиксируются методами магниторазведки и электроразведки [Gorkovets, Rayevskaya, 1997].

Приуроченность крупных муравейников участка к зонам разломов установлена путем нанесения координат центров муравейников на тектоническую схему участка (рис. 7, а). Положения муравейников четко трассируют тектонические зоны.

Причиной образования крупных муравейников считаем действие на муравьев радона, поднимающегося по тектоническим зонам. Несмотря на поверхностные фоновые уровни радиации 5–9 мкр/час, измеренные радиометром СРП-68, в водных источниках и гидрологических скважинах участка обнаружены высокие концентрации радона. Наибольшее значение 1300 Бк/л зарегистрировано в роднике на берегу озера, что косвенно указывает на наличие подпочвенного радона [Горьковец, Раевская, 1997].

Распределение концентрации подпочвенного радона между муравейниками измеряли четырьмя пространственно разделенными детекторами радона «Сирад М 106 N», размещенными на глубине 0,4–0,5 м в ямах, имеющих дополнительные вертикальные узкие каналы длиной 0,5 м. Для предохранения от

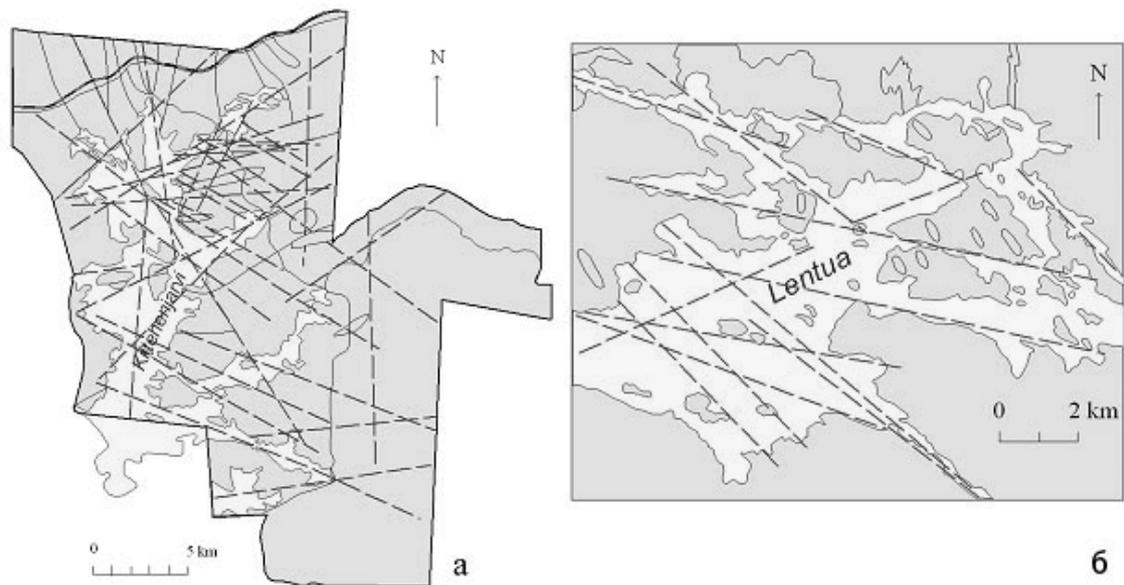


Рис. 6. Тектонические схемы территорий заповедников «Костомукшский» (а) и «Lentua» (б)

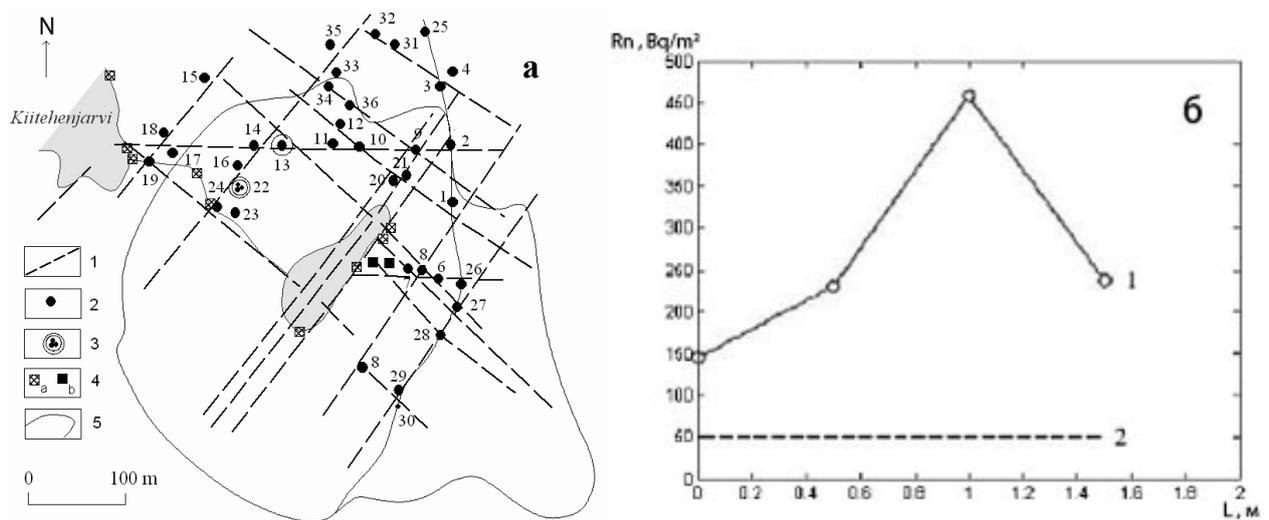


Рис. 7. а – схема разломов (1) с приуроченными к ним крупными муравейниками (2); (3) – разрушенные и восстановленные муравейники; (4) – гидрологические скважины и места отбора водных проб на радон; (5) – линии уровня. б – результаты измерений объемной активности радона (1) по профилю, перпендикулярному линии, соединяющей муравейники с номерами 7 и 8, и фоновые значения прибора (2)

влаги ямы сверху закрывали полиэтиленом и обкладывали дерном. Несколько детекторов использовали для съемки профиля концентрации радона в одном временном интервале. Время измерения объемной активности радона составляло 4 часа.

При первом измерении три детектора размещали на линии муравейников между муравейниками под номерами 7 и 8, а четвертый – в стороне на расстоянии 5 м. Показания детекторов соответственно составили 102, 112, 91 и 51 Бк/м³. Следующие измерения между теми же муравейниками были проведены на следующий день. Теперь детекторы размещали на

профиле, перпендикулярном линии муравейников, пересекающем ее в точке наибольшего показания первого эксперимента. Расстояние между детекторами составляло 0,5 м, а протяженность приборного профиля соответствовала диаметру подошвы муравейника. Максимум распределения концентрации радона 475 Бк/м³ был зафиксирован вблизи линии центров муравейников (рис. 7, б). В течение интервала измерений в полосе между муравейниками на поверхности при помощи газоанализатора DX6220 OEM измеряли концентрацию диоксида углерода, которая имела повышенное среднее значение – 460 ± 30 ppm.

Разгрузка флюидов в тектонических зонах сопровождается выносом легких газов водорода, гелия, метана, которые с глубины поднимают радиоактивный радон Rn, диоксид углерода CO² и высшие углеводороды. Поскольку подземная часть крупного муравейника составляет около двух метров [Муравейник...], почвенный радон и его дочерние продукты оказывают влияние на муравьев и среду их обитания [Пустолякова, 2013]. Мы полагаем, что в тектонические зоны муравьев привлекают высокие концентрации радона, который помогает им в противостоянии с паразитами.

В муравейнике живут разные виды паразитов [Муравьи...]. Наездники-эвхаритиды (*Eucharitidae*) откладывают яйца на растения, посещаемые муравьями. Вылупившиеся личинки прикрепляются к муравьям и переносятся ими в гнездо, где кормятся куколками хозяев. Муравьи не отличают их от собственного расплода. Молодые царицы *S. daguerri*, спарившись, проникают в гнезда муравьев и прикрепляются к крупным царицам. Муравьи кормят, чистят чужих цариц, выращивают их расплод. Часть паразитов питаются секретом и остатками корма муравьев. Из-за малости и малоподвижности чужаков хозяева не выгоняют их из гнезда. Личинки жуков *Myrmecophodius excavaticollis* также являются падальщиками. Взрослые жуки покидают гнездо хозяина и ищут новые колонии. Проникнув в них, они сохраняют неподвижность, подвергаясь атакам рабочих муравьев, пока не приобретут их запах. Не в силах прокусить прищельцев, муравьи теряют к ним интерес. Неэффективность средств распознавания прищельцев по запаху и борьбы с ними ведет к тому, что растущая численность паразитов становится обузой для муравейника. Через пару лет такая колония муравьев прекращает существование.

Выбор радиационных участков для муравейников помогает муравьям уничтожать паразитов. В таких участках из-за высокой скорости деления клеток в эмбриональной стадии и стадии личинки клетки паразитов чаще мутируют и гибнут. У муравьев скорость деления клеток ниже. Клетки их хитинового покрова делятся раз в год во время линьки [Кинкель...]. Кроме того, в популяциях насекомых при длительном радиационном воздействии наряду с увеличением числа мутаций различных типов генов идут процессы, повышающие устойчивость особей и отбор резистентных генотипов [Моссэ...].

Для количественного описания численности муравьев $x(t)$ и паразитов $y(t)$ в муравейнике со временем t предложена модель, заданная системой уравнений:

$$\begin{aligned} dx/dt &= ax - bxy \\ dy/dt &= cxy - dy \end{aligned} \quad (1)$$

с положительными коэффициентами a, b, c, d . Член ax характеризует скорость роста численности муравьев, член bxy связан с необходимостью муравьям обеспечивать паразитов. Член cxy определяет скорость увеличения численности паразитов, а член dy – скорость их естественной убыли. Эта модель аналогична модели «жертва–хищник» Лотки–Вольтерры [Lotka, 1925; Volterra, 1931]. Из ее стационарных решений

$$\begin{aligned} x &= 0, y = 0 \\ x &= d/c, y = a/b \end{aligned} \quad (2)$$

устойчивым оказывается ненулевое решение, определяющее численность муравьев отношением d/c .

Для тектонических зон коэффициенты a, b, c будем считать теми же, что и для других участков, а коэффициент d – имеющим большее значение вследствие радиации. В этом случае численность паразитов сохраняется, а численность муравьев оказывается большей. С учетом постоянства объема, приходящегося на одного муравья в муравейнике, модель объясняет увеличение размеров муравейников в тектонических и радиационных зонах. При этом число паразитов, приходящихся на одного муравья, уменьшается. Возможно, по этой причине муравьи крупных муравейников выглядят более энергичными и работоспособными.

Тепловые, электрические и химические свойства тектонических зон разломов также могут привлекать муравьев. Муравейники часто возникают рядом с генерирующими или аккумулирующими тепло элементами: стволом дерева, гниющим пнем, скалой, большим камнем. По сравнению с окружающей средой температура тектонических зон выше за счет тепла, переносимого флюидами, и низкой теплопроводности воздуха. Вклад в повышение температуры дает и конденсация водяного пара на ионах. Температура известных радоновых источников достигает 35 °C [Радоновые штольни...]. Для северных территорий даже небольшое приращение температуры, порядка градуса, усиливается положительной обратной связью: рост численности муравьев интенсифицирует диссипативные процессы в муравейнике. При средней летней температуре 14–18 °C температура внутри муравейника приближается к 26–28 °C. Размеры крупного муравейника способствуют снижению поддерживаемого градиента температур.

Как электрические насекомые, находящиеся в близком родстве с пчелами и осами, муравьи плохо переносят дождь: с приближением грозы реагируют на изменение знака поверхности Земли, спешат в муравейник, закрывают входы [Polk, Postow, 1996]. Активность разломов препятствует электрической переполнению

совке, а конденсация влаги на ионах уменьшает вероятность образования облаков и туч. Влага, сконденсированная в приземном слое, является важным ресурсом муравейника.

Из химических факторов тектонических зон отметим синтез муравьиной кислоты из углеводородных компонентов литосферных газов. Для их усвоения муравьям не требуется расщеплять твердое органическое вещество.

При адаптации к среде муравьи в полной мере используют ее особенности: потоки флюидов, энергию, геофизические поля. Крупные муравейники маркируют разломы, радиационные участки, участки отсутствия вечной мерзлоты. Тем самым они способствуют освоению территорий, снижая возможные риски.

Заключение

Начавшиеся более 20 лет назад исследования Зеленого пояса Фенноскандии и сопредельных территорий постоянно пополняются новыми объектами, данными, методиками и результатами. Полученные в этих исследованиях результаты свидетельствуют об эффективности и перспективности междисциплинарных подходов. Одним из таких подходов является изучение влияния кристаллического фундамента на биоту. Перспективность геоэкологических исследований в рамках этого подхода на территории Зеленого пояса Фенноскандии подтверждают следующие выводы.

1. Территория Зеленого пояса Фенноскандии является удобной платформой для постановки и проведения геоэкологических исследований.

2. Эндогенные флюиды распространяются по тектоническим зонам, преобразуют их минеральное вещество и действуют на биоту, выполняя роль агентов межгеосферных взаимодействий.

3. Поднимаемый флюидами на дневную поверхность радон оказывает радиационное воздействие на биосферу, вызывает структурные аномалии древесных растений и меняет популяционное равновесие хозяев и паразитов в муравейниках.

Авторы выражают благодарность за поддержку исследований Институту окружающей среды Финляндии, ОАО «Карельский окатыш», руководству заповедника «Костомукшский» и парка «Дружба».

Литература

Бекман И. Н. Радон – друг, помощник, враг. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2001.

Белашев Б. З., Болондинский В. К. Карельская береза — загадочное дерево севера // Наука в России. 2013. № 5 (197). С. 41–49.

Горьковец В. Я., Раевская М. Б. Геоэкологические исследования на территории заповедника «Костомукшский» // Проблемы геоэкологии Карелии / Под ред. И. Н. Демидова. Петрозаводск, 1997. С. 45–50.

Горьковец В. Я., Раевская М. Б. Геология и рудоносность геологических формаций Костомукшского рудного района // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования / Ред. Д. В. Рундквист. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 95–109.

Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н. Перспективное рудопроявление золота Костомукшского рудного района // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минералогия Северо-Запада России. Петрозаводск: Институт геологии Карельского научного центра РАН, 2007. С. 110–113.

Горьковец В. Я., Максимович Л. А., Раевская М. Б. Костомукша — крупнейший комплексный рудный объект Республики Карелия // Геология Карелии от архея до наших дней: материалы докладов Всероссийской конференции. Петрозаводск, 24–26 мая 2011 г. С. 188–196.

Горьковец В. Я., Раевская М. Б. Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минералогия: материалы научной конференции. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 150–152.

Горьковец В. Я., Раевская М. Б. Геологические особенности кристаллического фундамента в приграничной полосе Финляндии и Республики Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2009. № 2. С. 24–38.

Горьковец В. Я., Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н., Попов М. Г., Антонов А. В. Минералы – спутники алмазов в лампроитовой диатреме (Костомукшский район. Карелия) // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450, № 1. С. 62–65.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2006 г. / Ред. А. Н. Громцев, О. Л. Кузнецов. Петрозаводск, 2007. 308 с.

Григорьев А. А., Мирошников А. Е. Влияние геопатогенных зон на растения, животных и человека // Электронный ресурс. URL: <http://www.geomant92.ru/november2000.shtml> (дата обращения 04.06.2014).

Детектор-индикатор радона «Сирад МР 106» // Электронный ресурс. URL: http://www.indika-doimetri-msk.ru/tor_radona_sirad_mr-106 (дата обращения 02.06.2014).

Дэви Н. М. Морфогенез лиственницы сибирской в связи с современным изменением климата в высокогорьях Полярного Урала: автореферат дис. ... канд. биол. наук. Пермь, 2008.

Енгальчев С. Ю. Восходящие флюидные разгрузки и металлогения плитных комплексов Восточно-Европейской платформы // Вестник ВГУ, серия Геология. 2011. № 2. С. 16–25.

Захаров А. А., Калинин Д. А. Реконструктуризация и сохранение жизнеспособности комплекса муравейников FORMICA AQUILONIA в критических условиях // Успехи современной биологии. 2007. Т. 127, № 2. С. 190–202.

Ионизирующие излучения: источники и биологические эффекты // Доклад на Генеральной Ассамблее ООН за 1988. Т. 1. 882 с.

Калаев В. Н., Буторина А. К., Мильшин А. В., Вахтель В. М., Бабенко А. Г. О возможностях нестохастических биологических эффектов при облучении радоном в эквивалентных равновесных объемных активностях 200 и 400 Бк/м³ зебрины повислой // Вестник ВГУ, серия Химия, Биология. 2001. № 2. С. 109–113.

Кинкель Й. Устойчивы ли тараканы к радиации? // Электронный ресурс. URL: <http://www.dez.ocy.ru/joseph-kunkel/index.html#ray> (дата обращения 01.06.2014).

Крышень А. М., Титов А. Ф., Хейккиля Р., Громцев А. Н., Кузнецов О. Л., Линдхольм Т., Полин А. К. О границах Зеленого пояса Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 2. С. 92–96.

Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Тектонические узлы как каналы межгеосферного взаимодействия // Система «Планета-Земля» М.: ЛЕНАНД, 2010. С. 262–273.

Лазарев Ю. И. Структурная и метаморфическая петрология железистых кварцитов Костомукшского месторождения. Л., 1971. 126 с.

Моссэ И. Б. Генетические эффекты в природных популяциях животных, обитающих в радиационно-загрязненных районах Белоруссии // Информационный бюллетень № 3. Электронный ресурс. URL: chernobyl.iatp.by/rus/n3/Bul31-1.htm (дата обращения 03.06.2014).

Муравейник в разрезе // Электронный ресурс. URL: <http://m.babyblog.ru/community/post/mclub/52335> (дата обращения 06.06.2014).

Муравьи // Энциклопедия «Кругосвет». Электронный ресурс. URL: www.krugosvet.ru/enc/pauka_i.../MURAVI.html (дата обращения 06.06.2014).

Пустолякова Е. Муравейники как индикаторы талых зон в вечной мерзлоте / СОРАН INFO Наука. Сибирь. Общество, 11.02.2013 Электронный ресурс. URL: www.coprah.info/.../muraveiniki-kak-indikator-talykh-zon-v-vechnoi-merzlote (дата обращения 30.05.2014).

Радиометр «СРП-68» Электронный ресурс. URL: <http://www.ntfprompribor.ru/page145572> (дата обращения 02.06.2014).

Радоновые штольни в Австрии. Отдых и лечение // Электронный ресурс. URL: <http://ski-sun.ru/aus/radon> (дата обращения 01.06.2014).

Свириденко Л. П. Метаморфизм и гранитообразование в раннем докембрии Западной Карелии. Л., 1974. 155 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Горьковец Валентин Яковлевич

вед. науч. сотр., д. г.-м. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910,
эл. почта: gorkovet@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 782753

Белашев Борис Залманович

вед. науч. сотр., д. т. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: belashev@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 782753

Спутниковые технологии в геодинамике / Под ред. В. Н. Губина. Минск: Минсктиппроект, 2010 г. 88 с.

«СРС-05» Сейсмическая радоновая станция «НТМ-Защита» // Электронный ресурс. URL: <http://ntm.ru/products/133/7282> (дата обращения 07.06.2014).

Титов А. Ф., Буторин А. А., Громцев А. Н. и др. Зеленый пояс Фенноскандии: состояние и перспективы развития // Труды КарНЦ РАН. 2009. № 2. С. 3–11.

Шиманская Е. И., Вардуни Т. В., Вьюхина А. А., Чохели В. А. Разработка метода биотестирования недифференцированных факторов среды для территорий, приуроченных к зонам активных тектонических разломов, на основе анализа морфологических изменений у ценообразующих видов деревьев // Фундаментальные исследования, 2013. № 6 (часть 5). С. 1178–1183.

Экологические функции литосферы / Под ред. В. Т. Трофимова. М: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 432 с.

Drager X-am 5000 // Электронный ресурс. URL: http://www.draeger.com/sites/ru_ru/Pages/Chemical-Industry/Draeger-X-am-5000.aspx (дата обращения 31.05.2014).

Gorkovets V. Y., Rayevskaya M. B. Geology of the Kostomuksha Nature Reserve // Ecosystem, fauna and flora of the Finish-Russian Nature Reserve Friendship / Eds Tapio Lindholm, Raimo Heikkilä and Marjo Heikkilä Finish Environment Institute. Helsinki, 1997. P. 11–16.

Higashi S., Yamauchi K. Influence of a Supercolonial Ant Formica (Formica) yessensial Forel on the Distribution of Other Ants in Ishikari Coast // Japanese Journal of Ecology. 1997. N 2. P. 257–264.

Hokkanen T. J., Ieshko E., Heikkilä R. et al. Combining nature protection and local development in the southern part of the Green Belt of Fennoscandia / Terry A., Ullrich K., Riecken U. (eds.). Green Belt of Europe: From vision to reality: IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 2006. P. 79–91.

Lotka A. J. Elements of physical biology. Baltimore: Williams and Wilkins, 1925. 460 p.

Mann P., Nempton M. R., Bradley D. C., Burke K. Development of pull-apart basins // Journal of Geology, 1982. Vol. 91. P. 529–554.

Polk C., Postow E. (eds). Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields. Boca Raton. FL: CRC Press, 1996.

Volterra V. Lecons sur la theorie mathematique de la lutte pour la vie. P.: Gauthiers-Villars, 1931.

Gorkovets, Valentin

Institute of Geology, Karelian Research Center,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: gorkovet@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 782753

Belashev, Boris

Institute of Geology, Karelian Research Center,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: belashev@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 782753