ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2018, № 6, с. 81–92

## ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.4.08,551.4.042

# ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ РЯДА $^{232}$Th ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**© 2018 г. М. М. Иванов[1,*], В. Р. Беляев[1], Е. В. Гаранкина[1], А. Л. Гуринов[1], Л. В. Добрыднева[1], Н. В. Кузьменкова[2], Ф. А. Романенко[1], Е. Д. Туляков[1]**

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*

[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия*

**e-mail: ivanovm@bk.ru*

Поступила в редакцию 02.06.2017 г.
Принята в печать 27.07.2018 г.

Рассмотрен потенциал использования дочерних радионуклидов $^{232}$Th в качестве трассера при решении литодинамических и геоморфологических задач. Проанализированы геохимические особенности данного элемента, его формы нахождения в коренных горных породах и рыхлых отложениях, а также механизмы миграции. В отобранных в долине ручья Гакмана в Хибинском горном массиве (Кольский п-ов) сериях образцов отложений и речных вод на полупроводниковом гамма-спектрометре измерялись активности дочерних радионуклидов $^{232}$Th: $^{228}$Ac и $^{212}$Pb. В 1930-х годах здесь располагался ловчорритовый рудник, отвалы которого обогащены $^{232}$Th. Их материал перемещается разными природными процессами: селями, водоснежными потоками, эрозией и комплексом склоновых процессов. Выявлена пространственная неоднородность радионуклидного состава рыхлых отложений, анализ которой позволил наметить перспективные направления геолого-геоморфологических исследований, оценки экологических рисков в районах добычи радиоактивных торий-содержащих пород в горных условиях Субарктики и охраны природной среды.

*Ключевые слова:* радиоизотопные исследования, торий-232, Хибины, водоснежные потоки, Кольский полуостров, миграция радионуклидов

**DOI:** 10.1134/S2587556618060079

**Введение.** Одна из главных задач современных литологических исследований – реконструкция направлений и объемов перемещения материала в разных природных условиях. Для ее решения необходимо иметь надежные количественные индикаторы, позволяющие не только выявлять основные пути миграции вещества, но и рассчитывать интенсивность его перемещения. Таким индикатором (трассером) могут быть радионуклиды радиоактивного ряда $^{232}$Th, обладающего длительным периодом полураспада, который не зависит от внешних воздействий.

Для анализа сложного и многофакторного процесса миграции радионуклидов в природных системах мы остановились на долине Гакмана, расположенной на юге Хибинского горного массива в центре Кольского полуострова. В горах скорость геоморфологических процессов в целом выше, чем на равнинах, и результаты их деятельности более наглядны. Так, в долине Гакмана отвалы действовавшего в 1930-х годах ловчорритового рудника активно перерабатываются комплексом природных процессов на протяжении 80 лет, и содержащиеся в них радионуклиды обогащают разные фации рыхлых отложений. Наибольшее воздействие на перераспределение материала здесь оказывают периодически проходящие по долине катастрофические по мощности водоснежные потоки (ВСП, разновидность селей по В.Ф. Перову [9, 10]), которые наряду с лавинами являются наиболее опасными современными процессами в регионе. Сравнительно небольшие размеры долины и ее обособленность позволили рассмотреть процесс миграции радионуклидов при наличии антропогенного вмешательства.

Главная задача настоящей работы – выявление потенциала использования радионуклидов ториевого ряда для реконструкции интенсивности перемещения рыхлого материала экзогенными процессами.

**Радиохимические и геохимические предпосылки к использованию $^{232}$Th в качестве трассера.** Торий – 232 ($^{232}$Th) – природный радионуклид, наиболее долгоживущий изотоп тория ($^{232}$Th альфа-радиоактивен с периодом полураспада $1.405 \times 10^{10}$ лет).

Природный радиоактивный ряд нуклидов с массовым числом, представимым в виде 4n (ряд тория), начинается с встречающегося в природе $^{232}$Th и завершается образованием стабильного $^{208}$Pb. Концентрация $^{232}$Th в почвообразующих

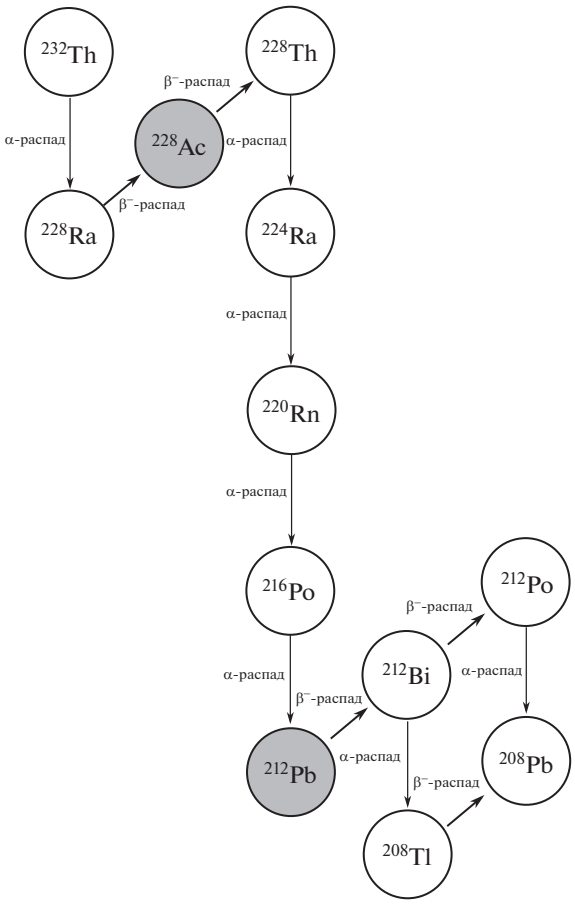


**Рис. 1.** Схема радиоактивного ряда $^{232}$Th.

или подстилающих породах определяет концентрацию его дочерних радионуклидов (рис. 1).

В природных соединениях $^{232}$Th имеет лишь одно состояние окисления IV, которое он проявляет в своих ионных и ковалентных соединениях. Из-за высокого сродства кислороду он встречается исключительно в кислородных соединениях.

Для тория не характерна миграция в растворенном состоянии. В системе порода–вода–осадок он преобладает в твердой фазе. Почти все минералы, содержащие торий, устойчивы к всевозможным природным воздействиям, и поэтому химические процессы не влияют на переотложение тория и не приводят к его концентрации в виде вторичных минералов [12]. Торий в горной тундре – наиболее инертный мигрант, хотя при этом не исключена и частичная водная миграция его изотопов [14]. Наблюдения в бассейне р. Илыч (Приполярный Урал) и лабораторные эксперименты с перетертыми образцами пород при комнатной температуре в течение суток [15, 16] показали, что под воздействием воды может выщелачиваться до 26.1% от содержания $^{232}$Th в породе, увеличение процента выщелачивания достигается лишь при участии более сильных реагентов (табл. 1).

В табл. 1 приведены результаты специально организованных опытов, где порода предварительно перетиралась и после этого помещалась в колбу с реактивом на сутки при регулярном перемешивании препарата. Естественные условия существенно отличаются от лабораторных более грубым механическим составом субстрата, низкими температурами и иной продолжительностью контакта с потенциальным реагентом. Следовательно, процент выщелачивания можно ожидать заметно ниже.

Итоговое содержание $^{232}$Th в рыхлых отложениях, формируемых на участках распространения магматических пород, определяется тремя факторами:

– содержанием радионуклидов в исходной кристаллической породе, обусловленным химизмом магматической камеры и процессом кристаллизации расплава;

– миграцией $^{232}$Th при выщелачивании и включении в биогеохимические циклы;

– миграцией изотопа при механическом перемещении частицы породы в процессе морфолитогенеза.

**Геолого-геоморфологическое строение долины Гакмана.** Долина Гакмана находится в южной части Хибинского горного массива (максимальная высота 1201 м над ур.м.) (рис. 2). Долину окружают платообразные горы и гребни абс. высотой 800–1000 м (отроги Большого Юкспорра), возвышающиеся над ее днищем на 150–350 м. Она названа А.Е. Ферсманом в 1921 г. [7] в честь финского петрографа В.А. Гакмана (1869–1941 гг.).

Ручей Гакмана имеет длину около 5 км и уклон около 100 м/км (10‰). Его нижнее течение полностью потеряло естественный облик за многие годы обустройства сооружений рудника Расвумчорр (начал работу в середине 1950-х годов) и при строительстве противоселевых плотин.

Бассейн ручья Гакмана отличается сложным геологическим строением. Верхняя часть водосбора лежит в области распространения трахитоидных фойяитов, частично ороговикованных [4–6]. Ниже долина последовательно пересекает полосы гнейсовидных и массивных рисчорритов, вмещающих жилы и дайки щелочных габброидов, базальтоидов и эгиринитов, апатито-нефелиновых руд, приконтактовую зону ийолит-уртитов в устьевой части (рис. 3).

Ниже, вдоль подножья обоих бортов, тянется наклонная террасовидная поверхность высотой до 15–25 м над урезом. Она сложена песчано-щебнисто-валунным материалом, представляющим собой фрагменты моренных отложений покровного ледника, в различной степени перекрытые обвально-осыпными конусами и шлейфами из щебня и глыб местного петрографического состава, поступающих с крутых склонов Высокого и Южного Юкспорра. Ниже по течению в эту на-

**Таблица 1.** Результаты экспериментов по выщелачиванию $^{232}Th$

| Выщелачивание $^{232}Th$ из метасоматитов (%) | | | |
|---|---|---|---|
| Образец | $H_2O$ | 5% $Na_2CO_3$ | 0.1 н $H_2SO_4$ |
| 1 | 0.44 | 0.8 | 54.7 |
| 2 | 2.35 | 18.4 | 53.4 |
| 3 | 0.53 | 0.79 | 62.9 |
| 4 | 26.2 | 35.7 | 67.8 |
| 5 | 0.74 | 0.88 | 72.9 |
| 6 | 0.78 | 1.41 | 78.9 |
| 7 | 0.71 | 0.61 | – |

| Выщелачивание $^{232}Th$ из горных пород при помощи 5% $Na_2CO_3$ (%) | |
|---|---|
| Порода | % выщелачивания |
| Гранит биотитовый | 4.6–8.0 |
| Гранит лейкократовый | 0.8 |
| Гранит аплитовидый | 3.5–20.3 |
| Метагранит | 3.8–6.6 |
| Амфиболит | 14.6 |
| Биотит-амфиболовый сланец в зоне разлома | 2.0 |
| Кварцито-песчаник | 15.5 |
| Кварцевый порфир | 3.43 |
| Сланец хлорит-серицитовый | 12.3 |

*Источник:* составлено по [15].

клонную площадку вложена построенная в 1932–1933 гг. автодорога на рудник. По левому борту здесь вплоть до уреза спускаются крутые скальные склоны.

Наконец, после заключительного поворота на юг, ручей прорезает крупный моренный вал. Здесь, в валунных песках сформировались крутые осыпные склоны высотой до 80 м, а по залегающим в их толще сложно построенным телам ленточнослоистых песков и алевритов – единичный крупный оползень-сплыв и ряд более мелких оплывин по правому борту. Днище занято хаотическими, иногда грядовыми накоплениями зоны торможения водоснежного потока начала 1990-х годов, который серьезно угрожал руднику Расвумчорр. Ниже вала была построена противоселевая плотина, полностью изменившая характер естественного русла, и дамба, оттеснившая его к северу под склон Южного Юкспорра [1].

В правом борту средней части долина Гакмана (ее среднее субширотное "колено") пересекает обширную зону разломов, к которой приурочено самое крупное в Хибинах месторождение радиоактивных минералов [8]. Это так называемое Юкспоррское ловчорритовое месторождение – пегматитовое эгирин-полевошпатовое ловчоррит-ринколитоносное жильное поле, приуроченное к эгирин-роговообманковым гнейсовидным рисчорритам. Главный рудный минерал ловчоррит – фторсодержащий титаносиликат кальция, натрия и редких земель, стекловатая или мелкокристаллическая разность ринколита. Средняя проба одного из участков состоит из 53.8% полевого шпата, 19.4% пироксена эгирина и амфиболов, 17.9% нефелина, 6.5% собственно ловчоррита и ринколита, а также 1.6–2.3% эвдиалита, апатита, титанита и до 0.5% сульфидов. Она содержит оксиды редких земель 11–17%, $ThO_2$ – 0.5–1%, $Nb_2O_5$ и $Ta_2O_5$ – около 2%, а также 0.02–0.25% $U_3O_8$. Главный полезный компонент руды – оксиды редких металлов.

Руководство комбината "Апатит", основанного в 1929 г., в 1931 г. приняло решение основать в долине Гакмана ловчорритовый рудник, в 1933 г. развернулись обширные горные работы. Годовая производительность рудника должна была составлять 33 000 т руды в год. Первые 30 т руды, при добыче которой переместили 1300 т рудной массы, содержали до 40–45% ловчоррита [8].

Прекращение добычи было связано с тем, что технологическая схема обогащения ловчорритовой руды, разработанная комбинатом "Апатит", оказалась очень сложной и требовала целого ряда операций. Качество концентрата сильно менялось и в целом оставалось невысоким, поэтому в 1939 г. "Главредмет" от него отказался [8], и рудник законсервировали. Попытки возобновить разведку в 1946 г. также не дали нужного результата.

Постепенно лавины и водоснежные потоки (ВСП) разрушили практически все строения в долине Гакмана, от которых к настоящему времени

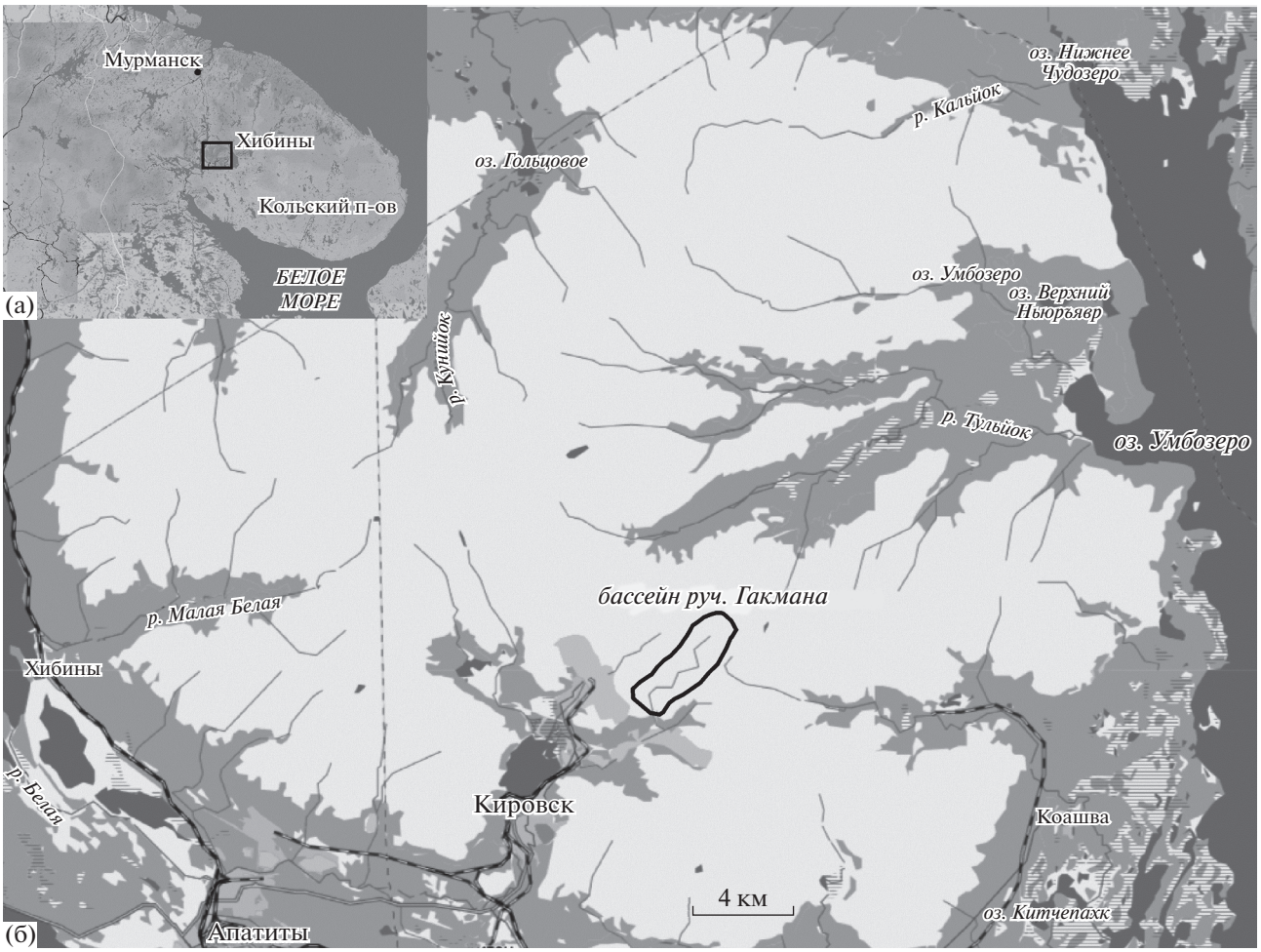


**Рис. 2.** Полигон исследования. а – расположение Хибинского горного массива на территории Кольского полуострова; б – расположение бассейна руч. Гакмана в Хибинском горном массиве (источник схемы – интернет-портал Яндекс Карты).

остались руины – фрагменты стен, фундаментов, опор. Уходящие в глубь скальных стенок штольни, перед порталами которых выработаны плоские площадки шириной до 15 м, заваленные упавшими обломками, фрагментами металла и дерева, в том числе лестниц, рельсов и деревянных труб, часто посещаются посторонними, так как рудник есть на всех туристических картах. На них отмечена также повышенная мощность дозы в штольнях – до 500 мкр/ч.

Крутые борта и значительный уклон днища (рис. 4) долины Гакмана превращают ее в арену действия интенсивных экзогенных процессов (рис. 5). Среди них выделяются своей активностью гравитационные (осыпи и обвалы), эрозия (линейная и плоскостная), солифлюкция, дефляция, а также лавины и сели. Встречаются также единичные оползни-сплывы.

Осыпи развиты практически на всем протяжении долины и тяготеют к ее левому борту. В составе коллювия преобладают щебень и мелкие глыбы, в нижнем течении, где река прорезает моренный вал, – пески и валуны. Здесь, на крутых (25–40°) высоких (до 80 м) обнаженных склонах моренного вала по правому борту также активна дефляция. Сильный ветер в прибровочной части уступов вызывает песчаные бури, вынося материал до мелкогалечной размерности. Плотная кустарничково-злаковая дернина теряет опору и нависает над склоном, образуя ниши глубиной до 0.5–0.8 м.

Незначительные по площади участки на склонах в нижнем течении реки сложены рыхлыми отложениями, которые при практическом отсутствии растительного покрова подвергаются плоскостной эрозии.

Солифлюкция широко распространена на задернованных склонах и максимально интенсивна на левом борту долины в нижнем течении, где она формирует серии террасок [3]. На противоположном борту весной 2000 г. по мерзлой кровле водоупорных ленточно-слоистых песков и алевритов сместился оползень-сплыв со стенкой срыва полукруглой формы и шириной до 30 м. Наличие зон отрыва, транзита и аккумуляции сближает его с аналогами, широко известными в области вечной мерзлоты.

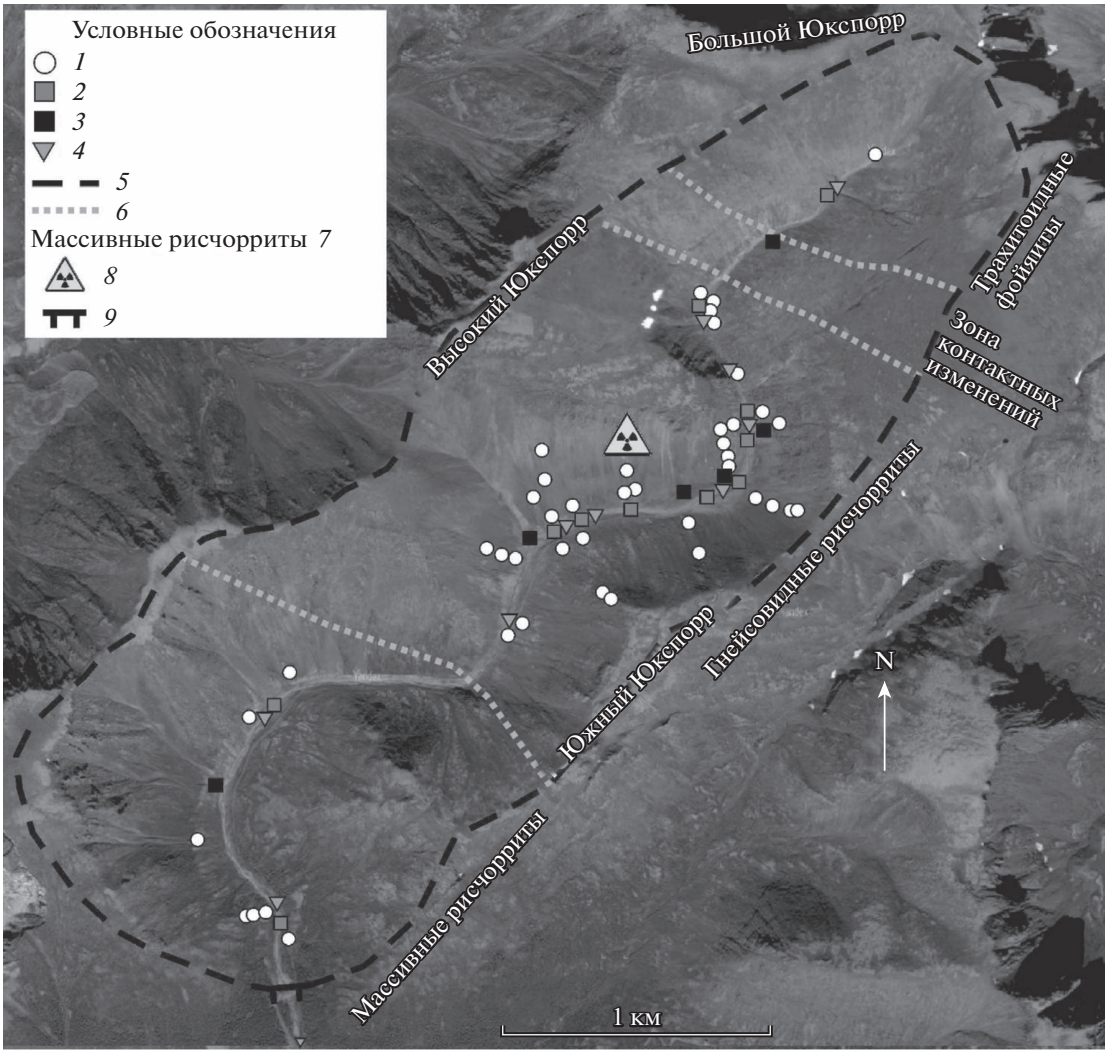


**Рис. 3.** Геологическое строение и расположение точек отбора проб в долине Гакмана. Точки отбора проб: *1* – на склонах; *2* – в днище; *3* – на конусах выноса; *4* – в русле; *5* – граница бассейна руч. Гакмана; *6* – границы основных геологических комплексов; *7* – название основных геологических комплексов; *8* – рудник “Ловчоррпут” (источник снимка – Yandex); *9* – противоселевая плотина.

Валунно-галечное порожисто-водопадное русло реки, где оно не проходит непосредственно по скальному цоколю, сильно меняется при прохождении руслоформирующих расходов весной или после сильных осадков. Мощным фактором, влияющим на формирование рельефа и отложений днища долины, является лавинная активность. Лавины сильно затрудняли деятельность ловчорритового рудника, а катастрофа 5 декабря 1935 г., когда в пос. Кукисвумчорр погибло 90 человек, убила сторожа склада взрывчатых веществ И.А. Архипова [11]. Здание склада было разбито в щепки. Снежные лавины сходят в долине Гакмана почти каждый год, часто перегораживая ее в разных местах. В результате в днище долины формируются участки накопления снега значительной (несколько метров) мощности, которые сохраняются на протяжении большей части летнего периода и существенно влияют на локальное течение эрозионно-аккумулятивных процессов.

Но главным образом облик нижних частей склонов и днища долины определяется прохождением водоснежных потоков (ВСП). Для этой специфической разновидности снеговых селей, впервые выявленной в Хибинах В.Ф. Перовым, характерны [2, 9, 13]:

– возникновение только весной в период бурного снеготаяния или выпадения обильных дождевых осадков при большом количестве снега в руслах водотоков, при прорыве снежных плотин, образованных лавинами;

– насыщенность снежной массы водой (20–70%);

– насыщенность каменным материалом (до 12%).

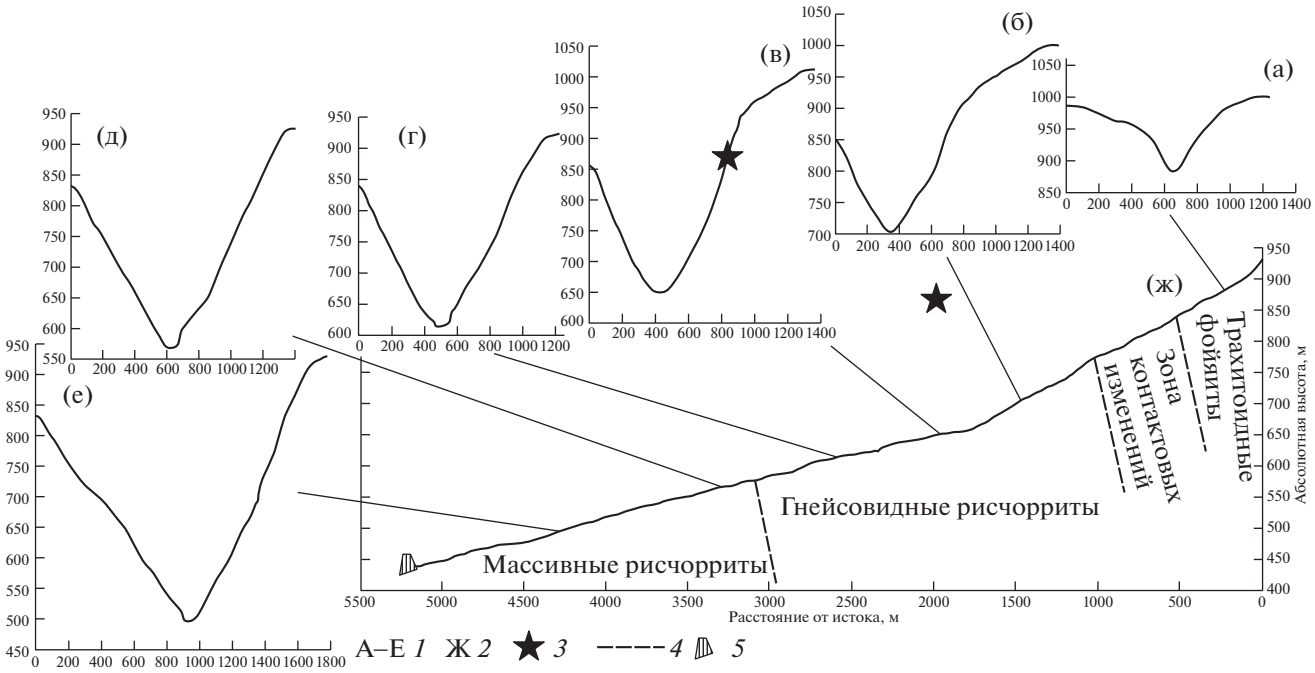


**Рис. 4.** Поперечные профили через долину руч. Гакмана (расположение профилей на рис. 5).

Массовые образования ВСП в разных районах Хибин [13] имели место в мае 1977 г. (37 очагов) и в мае 1987 г. (28 очагов). Объемы некоторых из них достигали 70 тыс. м$^3$. Аналогичные события произошли в мае 1951 или 1952 г. [9]. Всего в Хибинах насчитывается около 300 очагов ВСП, и с точки зрения рельефообразования, это, пожалуй, важнейший процесс современной морфо- и литодинамики.

Катастрофический ВСП сошел в долине Гакмана в мае 1995 г. [1]. Он всерьез угрожал строениям рудника Расвумчорр, что и побудило к строительству защитной плотины и антропогенной перестройке всего русла ниже нее.

Участки аккумуляции ВСП по облику похожи на конусы выноса временных водотоков. Они имеют конусообразную форму, если образуются в месте выхода потока на участки с меньшими уклонами, или валообразно вытянуты вдоль русла, если они находятся на перегибе продольного профиля (р. Гакмана), и оказываются зажатыми между скальными стенками. Как правило, рельеф зон торможения отличается беспорядочным сочетанием вытянутых вдоль тальвега гряд высотой до 1.5 м, разделяющих их ложбин, хаотических скоплений валунов, отдельных крупных глыб. Выстилающий днище долин материал – это смесь обломков разной крупности, несортированного песка, а также веток и стволов деревьев, вырванных целиком кустарников, кусков дернины и т.д. Ширина крупных конусов может достигать 200–300 м, длина – 2–3 км. Окатанность обломков сильно колеблется, так как связана преимущественно с составом исходного материала зон формирования и транзита ВСП. Его источниками служат как падающие на снег неокатанные блоки породы с окружающих склонов, так и размываемые толщи ледниковых и водно-ледниковых отложений, в которых встречаются и хорошо окатанная галька, и валуны.

Значительная мощность и, видимо, довольно частая повторяемость ВСП в долине Гакмана обусловливают практическое отсутствие чисто русловых форм и препятствуют развитию нормального флювиального процесса. ВСП перестраивают морфологию днища и заставляют водоток формировать новое русло, что позволяет рассматривать их как ведущий рельефообразующий процесс и основной агент перераспределения материала в днище.

**Методика исследования.** Так как строение долины – ключ к пониманию современных процессов миграции твердого вещества, то сбор фактического материала необходимо было проводить с учетом расположения морфолитодинамических зон – морфологически обособленных участков земной поверхности, где под воздействием определенных рельефообразующих процессов проявляются четкие тенденции к денудации, накоплению или транспортировке вещества через выделенный участок. Исходя из геоморфологического строения и основных современных экзогенных процессов, формирующих чехол рыхлых отложений в масштабе долины Гакмана, можно выделить три типа морфолитодинамических зон (табл. 2). Представленная схема разделения является в зна-

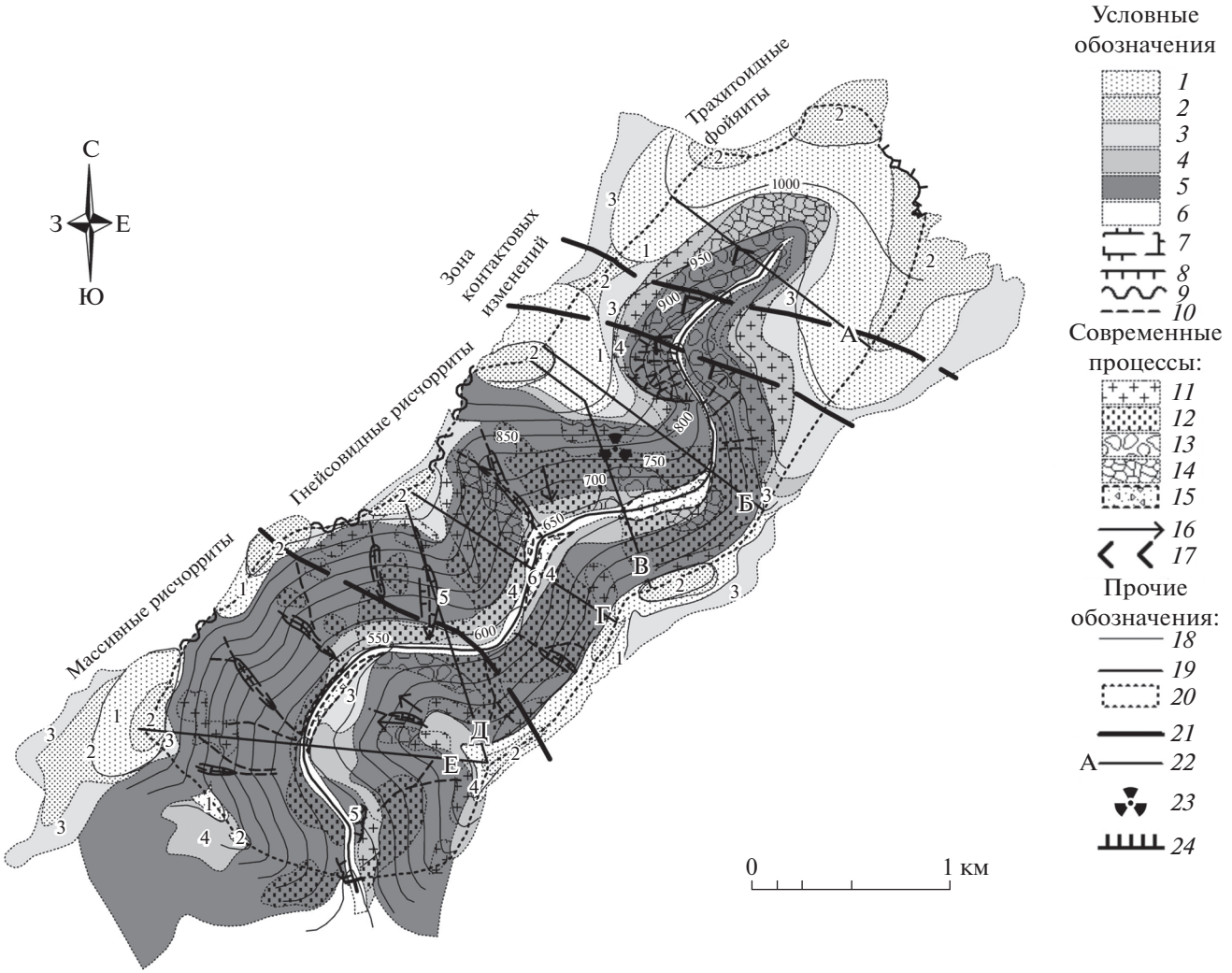


**Рис. 5.** Геоморфологическая схема долины Гакмана: *1* – пологонаклонные вершинные поверхности; *2* – пологовыпуклые и субгоризонтальные вершинные поверхности; *3* – склоны крутизной до 15 градусов; *4* – склоны крутизной 15–35 градусов; *5* – склоны крутизной более 35 градусов; *6* – днище главной долины; *7* – участки склонов гравитационного сноса с обнажениями коренных пород; *8* – участки развития оползневых процессов; *9* – курумы активные; *10* – курумы стабилизировавшиеся; *11* – конусы выноса и зоны разгрузки ВСП; *12* – четкие бровки врезов; *13* – бровки обрывов; *14* – округловершинные гребни; *15* – тальвеги врезов; *16* – участки схода микроселей; *17* – отдельные осыпные конусы; *18* – горизонтали (интервал 50 м); *19* – русло руч. Гакмана; *20* – граница бассейна; *21* – предполагаемые границы основных петрографических комплексов; *22* – положение и обозначение поперечных профилей; *23* – положение рудника; *24* – противоселевая плотина.

чительной мере генерализованной, направленной на рассмотрение исследуемой долины в качестве единой морфолитодинамической системы и не описывающей локальные особенности проявления тех или иных рельефообразующих процессов.

Появление рудных отвалов с повышенным содержанием радионуклидов на борту долины представляет собой антропогенно вызванный “сигнал”. Учитывая его наличие, миграция радионуклидов при такой морфолитодинамической структуре водосбора будет осуществляться главным образом как прохождение “сигнала” по особым каналам от верховьев бассейна к его устью (рис. 6). В качестве агентов переноса сигнала выступают геоморфологические процессы (процессы морфолитогенеза), которые меняют и исходное удельное содержание радионуклидов в образуемых отложениях за счет избирательного выноса, концентрации или перемешивания материала из разных источников.

Положение входа данного “сигнала” в структуре бассейна разделяет его на две части: “чистую” зону выше по течению с отсутствием сигнала и ниже по течению – зону его потенциального распространения. В долине Гакмана нижней границей этой зоны распространения является устье бассейна, где русло и чехол рыхлых отложений нарушены горными работами.

**Таблица 2.** Основные типы морфолитодинамических зон долины Гакмана

| Типы | Геоморфологическое положение | Основные современные экзогенные процессы |
|---|---|---|
| Денудационные | верхние и средние части склонов долины | обвалы, осыпи |
| Транзитные | русло ручья | водная эрозия/аккумуляция ВСП, лавины, сели |
| Аккумулятивные | нижние части склонов долины, днище долины, конусы выноса | ВСП, лавины, сели |

Для оценки степени воздействия антропогенного "сигнала" на современное распределение радионуклидов ториевого ряда в бассейне р. Гакмана следовало решить три основные задачи:

1. Оценить силу "сигнала", сопоставив удельное содержание радионуклидов в рудных отвалах с их содержанием в склоновом чехле на участках распространения разных геологических комплексов в долине.

2. Определить рубежи зон отсутствия и потенциального воздействия "сигнала", устанавливая с помощью крупномасштабной геоморфологической съемки положение морфолитодинамических зон и выбирая контрольные участки отбора образцов для лабораторного анализа.

3. На основе полученных данных оценить влияние отвалов ловчорритового рудника на радиоактивную обстановку в долине Гакмана.

Отбор проб рыхлых отложений производился преимущественно на трех контрольных участках, играющих принципиально важную роль в перераспределении наносов и ассоциированных с ними радионуклидов.

Первый такой участок располагался в верховьях бассейна р. Гакмана выше ловчорритового рудника, в не нарушенных человеком условиях. Образцы второго участка (непосредственно в створе горных выработок и ниже по течению ручья) должны показать степень воздействия рудных отвалов на содержание радионуклидов в днище долины и русле ручья и их соотношение с концентрациями в прилегающих склоновых отложениях. Третий участок лежит в низовьях долины, на краю распространения влияния "сигнала". 70 отобранных в 2015–2016 гг. образцов разделяются на четыре группы в зависимости от геоморфологического

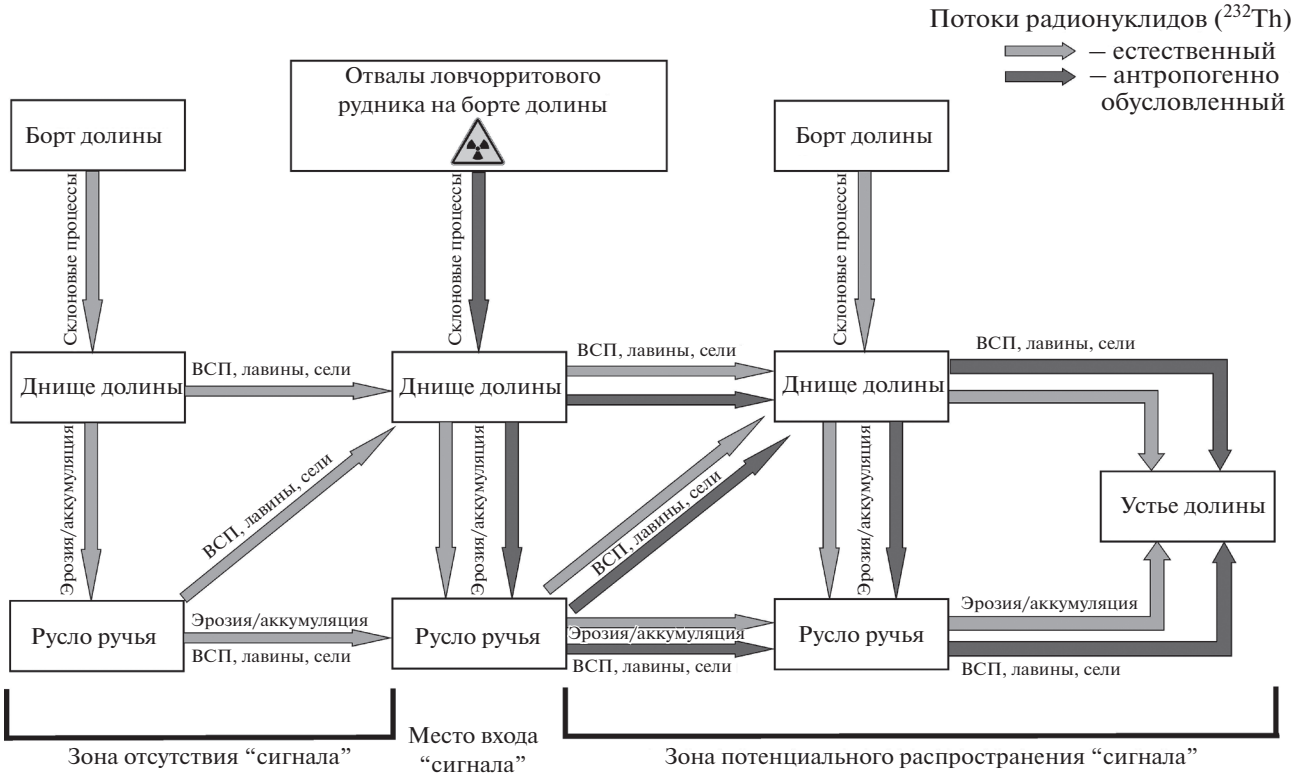


**Рис. 6.** Общая схема миграции радионуклидов ряда $^{232}$Th в долине Гакмана.

положения: 44 взяты на склонах, 14 – в днищах, 6 – на конусах выноса и 11 – в русле реки (см. рис. 3). Отбирались относительно тонкие фракции рыхлого материала – преимущественно гравий, дресва, песок и (при наличии) алевритисто-глинистая составляющая. Пробы отбирались методом конверта из 5 точек, покрывающих заданный участок лито-динамической зоны, и смешивались для осреднения в лабораторных условиях.

В лаборатории на полупроводниковом гамма-спектрометре СКС-07П(09П)_Г_Р с планарным детектором из сверхчистого германия производства компании ООО НИИП "Грин Стар Инструментс" измерялась гамма-активность образцов для дочерних радионуклидов $^{232}$Th: актиния – 228 ($^{228}$Ac) и свинца – 212 ($^{212}$Pb).

Отобраны также образцы воды по всей долине для определения ее химических свойств и потенциальной способности к выщелачиванию, и опробованы снежники – один из основных источников питания ручья. В образцах воды определены pH, общее количество растворенных веществ (удельная электропроводность), а также анионный и катионный состав (посредством жидкостной хроматографии).

**Результаты и обсуждение.** Гамма-спектрометрический анализ показал равновесное соотношение удельных активностей дочерних радионуклидов $^{228}$Ac и $^{212}$Pb (см. рис. 1), что позволяет достоверно судить об относительном распределении $^{232}$Th.

На склонах максимальное содержание радионуклидов прослеживается в центральной части долины. При этом на правом борту (рис. 7а), где располагается рудник Ловчоррпут, средние активности в отложениях существенно выше, чем на левом (рис. 7б). Такое распределение может указывать на то, что при заложении долины руч. Гакмана по системе трещин устойчивое обогащенное торием рудное тело практически полностью оказывается экспонированным на правом борту долины. На левом борту в зоне рудопроявления содержание радионуклидов существенно колеблется, что может быть связано с локальными участками рудопроявления, простирающихся в крест долине, которые были прорезаны в наиболее узких участках.

На участках денудации, перекрытых склоновыми отложениями, связь количества радионуклидов с геологическим фоном наиболее тесная. Это вполне ожидаемо, поскольку петрографический состав частиц склоновых отложений не успевает сильно измениться, в значительной степени являясь продуктом разрушения и смещения скальных пород (физическим выветриванием и обвально-осыпными процессами). Вниз по долине значения средней удельной активности сначала увеличиваются к ловчорритовому руднику, а затем падают к устью (рис. 7в).

**Таблица 3.** Распределение средних удельных активностей $^{232}$Th в отложениях на склонах и днище на различных участках от зоны выработки радиоактивных руд, Бк/кг

| Расположение | Склоны | Днище |
|---|---|---|
| Выше по течению | 89.5 | 28.9 |
| В зоне горных выработок | 165.7 | 132.1 |
| Ниже по течению | 33.4 | 49.9 |

В самых верхних частях долины содержания $^{232}$Th в отложениях днища существенно ниже, чем в склоновых отложениях. Немного выше рудника содержание радионуклидов возрастает до максимальных значений и сохраняется ниже радиоактивных отвалов. Вероятно, в процессе развития долины выше рудника естественные процессы вскрыли богатые торием породы, находящиеся на продолжении зоны разломов, а ниже добавилась антропогенная составляющая (табл. 3). В непосредственной близости от рудника располагается зона аккумуляции материала, обусловленная деятельностью ВСП. На данном участке содержание радионуклидов в отложениях очень близко ко средневзвешенному их содержанию в склоновых отложениях на части бассейна, примыкающего к данному створу выше по течению, что указывает на наличие перемешивания материала и усреднение радионуклидного состава отложений днища. Но ниже по течению происходит синхронный спад удельных активностей на склонах и в днище непропорционально спаду средневзвешенных показателей. Видимо, ниже зоны аккумуляции ВСП роль участия верховий бассейна руч. Гакмана существенно снижается, хотя отложения в днищах остаются несколько более радиоактивными, чем на склонах.

Распределение радионуклидов в русловых отложениях можно охарактеризовать как наиболее равномерное по всему бассейну, с плавным трендом к убыванию от верховьев долины к низовьям (рис. 7г). Зависимостей между ними и распределением нуклидов в остальных типах отложений, а также от петрографического состава пород не наблюдается. Подобного рода осреднение происходит, скорее всего, в результате постоянного процесса миграции твердого материала, при котором может наблюдаться как уменьшение удельных активностей по сравнению со склонами в самих верховьях, так и их увеличение в нижнем течении. Химический состав слабощелочных речных вод с чрезвычайно низкой минерализацией не предполагает интенсивного выщелачивания и миграции элементов в ионном состоянии (табл. 4). Важно отметить, что на участке радиоактивного рудопроявления не наблюдается существенного увеличения активностей в русле. Вполне вероят-

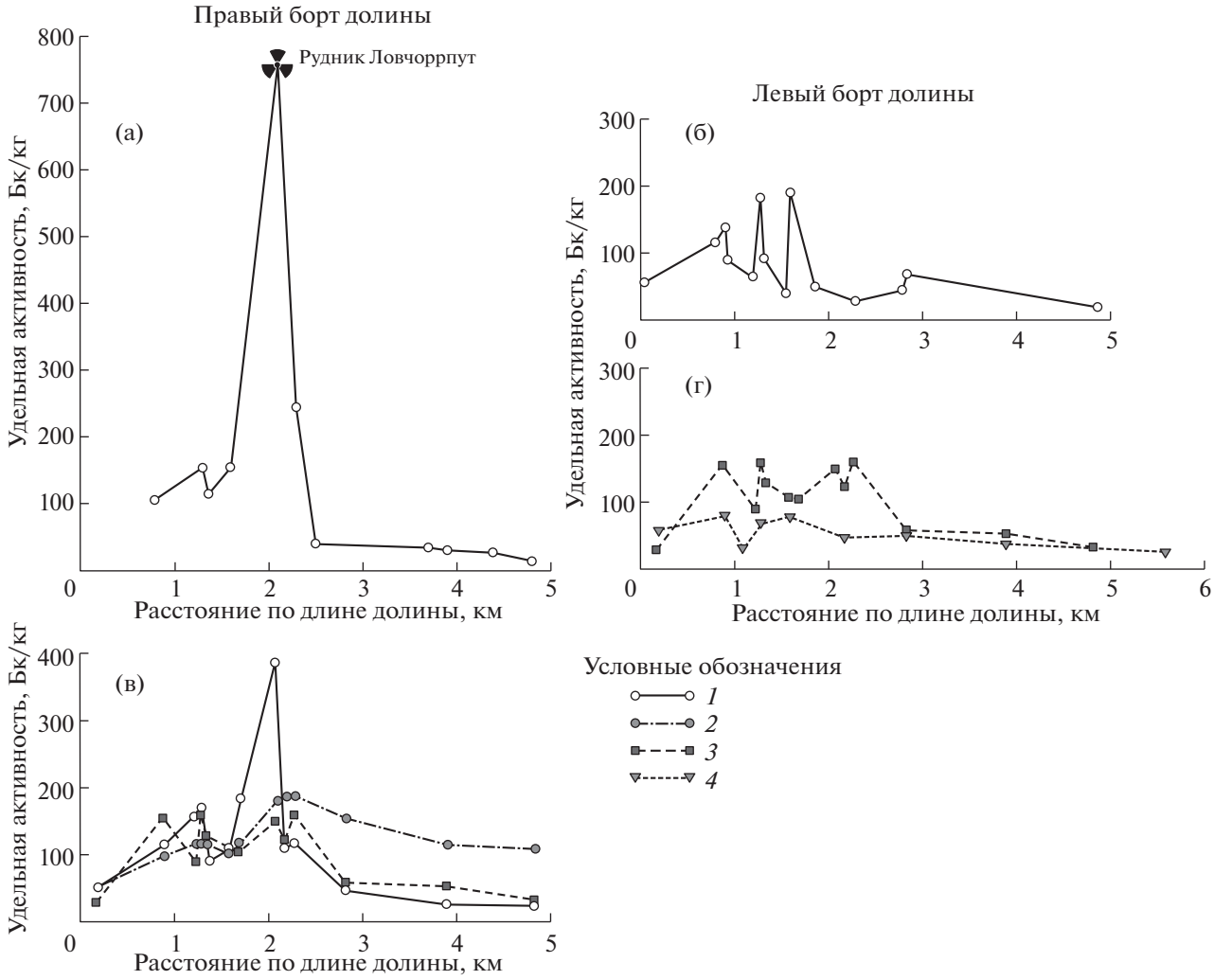


**Рис. 7.** Графики распределения удельных активностей радионуклидов в различных типах отложений: а, б – на бортах долины; сопоставление средних и средневзвешенных активностей: на склонах и в днище долины (в), в отложениях днища и русла (г). *1* – средняя активность на склонах (для обоих бортов); *2* – средневзвешенная активность на склонах, рассчитанная для части бассейна, расположенного выше по течению от конкретной точки; *3* – активность в днище; *4* – активность в русле.

но, подобное распределение обусловлено тем, что наибольшая часть радионуклидов сосредоточивается в наиболее тонких фракциях отложений и вымывается вместе с водными потоками. Ввиду этого возникает гипотетическая возможность изучать интенсивность денудации в бассейне при наличии приемного водоема, где происходило бы накопление вымываемых тонких фракций, сопоставляя содержание искомых радионуклидов в отложениях водоема с их содержанием в породах питающего его бассейна.

**Выводы.** Проведенное нами исследование позволило установить ряд систематических неоднородностей распределения радионуклидов ряда $^{232}$Th в зависимости от геологического строения положения в рельефе долины и характера переноса материала (относительно участков сноса, транзита и аккумуляции) и прийти к следующим выводам:

1) Неоднородность распределения радионуклидов в склоновых отложениях определяется исходным составом пород и морфоструктурным контролем, возникающим при заложении долины в сложных геологических условиях.

2) Участие эпизодических, но высоко интенсивных ВСП в верховьях бассейна руч. Гакмана проявляется в мощном выносе обломочного материала вниз по долине. Радиоактивность отложений в зоне разгрузки ВСП близко к средневзвешенной активности в склоновых отложениях выше по течению. Исходя из этого следует, что ВСП относительно равномерно захватывают материал со всего вышележащего бассейна, перемешивая его в процессе переноса.

3) В настоящее время остатки рудника Ловчоррпут оказывают значимое воздействие на радиоактивность отложений в долине руч. Гакмана

**Таблица 4.** Химический состав воды (GW 1–3, 5–8) из русла и снежников (GW 3, 9) в долине Гакмана

| Образец | pH | Удельная электропроводность, мкСм/м* | Концентрации основных растворенных компонентов, мг/л | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Na | K | Mg | Ca | Cl | $NO_3$ | $SO_4$ | Всего |
| GW 1 | 8.3 | 0.15 | 2.6 | 1.38 | 0.13 | 0.62 | 1.25 | 0.26 | 1.45 | 7.69 |
| GW 2 | 8.1 | 0.13 | 2.5 | 0.52 | 0.03 | 0.5 | 0.72 | 0.41 | 1.6 | 6.28 |
| GW 3 | 9.1 | 0.93 | 17.2 | 1.18 | 0.02 | 0.64 | 1.87 | 0.47 | 3.33 | 24.71 |
| GW 4 | 8.5 | 0.03 | 0.54 | 0.6 | 0.02 | 0.28 | 0.65 | 0.25 | 0.1 | 2.44 |
| GW 5 | 8.2 | 0.13 | 2.95 | 0.8 | 0.09 | 0.65 | 0.67 | 0.35 | 1.55 | 7.06 |
| GW 6 | 7.8 | 0.22 | 1.42 | 0.05 | 0.23 | 1.32 | 1.2 | 0.38 | 1.85 | 6.45 |
| GW 7 | 8 | 0.31 | 4.28 | 3.58 | 0.27 | 1.7 | 2.12 | 0.4 | 2.09 | 14.44 |
| GW 8 | 8.5 | 0.14 | 2.2 | 1.42 | 0.02 | 0.22 | 0.8 | 0.29 | 0.45 | 5.4 |
| GW 9 | 6.5 | 0.21 | 2.09 | 1.11 | 0.1 | 1.02 | 0.7 | 0.31 | 1.67 | 7 |
| Дист. вода | 5.85 | 4.5 | 0.5 | 0.45 | 0.05 | 0.65 | 0.18 | 0.1 | 0.27 | 2.5 |

только на локальном участке, непосредственно примыкающем к самому руднику ниже по течению ручья. Однако малое содержание радионуклидов в отложениях в русле ручья, дренирующего радиоактивные толщи, указывает на то, что большой запас радионуклидов, по-видимому, сосредоточен в наиболее тонких фракциях, вымываемых вместе с водой.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-05-00630) в рамках госзадания Кафедры геоморфологии и палеогеографии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова № АААА-А16-11632810089-5 “Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования”.

**Acknowledgements.** The investigation was funded by RFBR (project no. 17-05-00630) according to the state assignment of the Department of Geomorphology and Paleogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University no. AAAA-A16-11632810089-5 “Evolution of the environment, dynamics of relief and geomorphic safety of landuse”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев Г.С.* Катастрофические процессы рельефообразования. М.: Изд-во МГУ, 1998. 102 с.
2. Водоснежные потоки Хибин / под ред. А.Н. Божинского, С.М. Мягкова. М.: Географический факультет МГУ, 2001. 167 с.
3. *Гаранкина Е.В.* Эволюция криогенного микрорельефа гор Субарктики: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: Географический факультет МГУ, 2013. 206 с.
4. Геологическая карта Хибинских тундр. 1:50 000. Апатиты: Геологическая служба Финляндии и Геологический институт КНЦ РАН, 2014.
5. Геология рудных районов Мурманской области / ред. В.И. Пожиленко, Б.В. Гавриленко, Д.В. Жиров, С.В. Жабин. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. 359 с.
6. *Зак С.И., Каменев Е.А., Минаков Ф.В., Арманд А.Л., Михеичев А.С., Петерсилье И.А.* Хибинский щелочной массив. Л.: Недра, 1972. 176 с.
7. *Кошечкин Б.И.* Тундра хранит след. Мурманск: Мурманское книжное издательство, 1979. 152 с.
8. *Красоткин И.С., Лесков А.Л., Войтеховский Ю.Л., Шпаченко А.К.* Бурное прошлое ущелья Гакмана // Петрология и минерагения Кольского региона. Труды V Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 90-летию со дня рождения д.г.-м.н. Е.К. Козлова. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. С. 44–48.
9. *Перов В.Ф.* Селевые потоки Хибинского горного массива // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. 1966. № 1. С. 106–110.
10. *Перов В.Ф.* Селевые явления. Терминологический словарь. М.: Изд-во МГУ, 1996. 34 с.
11. *Ржевский Б.Н.* Обстоятельства и причины лавинной катастрофы 1935 г. в Хибинах // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Труды VII Всероссийской Ферсмановской научной сессии, посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН (Апатиты, 2–5 мая 2010 г.) и Областной конференции, посвященной 75-летию историко-краеведческого музея г. Кировска (22–23 апреля 2010 г.). Апатиты: изд-во K & M, 2010. С. 211–215.
12. *Рябчиков Д.И., Гольбрайх Е.К.* Аналитическая химия тория. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 297 с.
13. *Сапунов В.Н.* Водоснежные потоки в Хибинах // Материалы гляциологических исследований. 1991. Вып. 71. С. 94–99.
14. *Титаева Н.А.* Ядерная геохимия. М.: Изд-во МГУ, 2000. 336 с.
15. *Титаева Н.А., Таскаев А.И.* Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны. Л.: “Наука”, 1983. 232 с.
16. *Титаева Н.А., Филонов В.А., Овченков В.Я., Векслер Т.И., Орлова А.В., Тырина А.С.* Поведение изотопов урана и тория в системе кристаллические породы – поверхностные воды в условиях холодного гумидного климата // Геохимия. 1973. № 10. С. 1522–1527.

# Application of $^{232}$Th Daughter Radionuclides for Studying Exogenic Processes

**M. M. Ivanov[1,*], V. R. Belyaev[1], E. V. Garankina[1], A. L. Gurinov[1], L. V. Dobrydneva[1], N. V. Kuz'menkova[2], F. A. Romanenko[1], and E. D. Tulyakov[1]**

[1] *Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia*

[2] *Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russia*

**e-mail: ivanovm@bk.ru*

Received June 02, 2017
Accepted July 27, 2018

The potential of application of $^{232}$Th daughter radionuclides as tracer in lithodinamic and geomorphic investigations was explored. It was analyzed geochemical particularities of this radionuclide, its occurrence in rocks and sediments and ways of migration. A series of samples of sediments and river waters was collected within the Hackman canyon in the Khibiny Massif (the Kola Peninsula) and analyzed by a semiconductor gamma spectrometer to recognize activity of $^{232}$Th daughter radionuclides: $^{228}$Ac and $^{212}$Pb. In the 1930-s there was a lovchorrite mining within Hackman canyon, which tailings were enriched in $^{232}$Th. Their material is moved by different natural processes: mudflows, snow-water flows, erosion and complex slope processes. The spatial heterogeneity of radionuclide composition of loose sediments is detected, the analysis of which allowed to identify promising areas of geological-geomorphological studies and environmental risk assessment in the areas of production of radioactive thorium-containing rocks in the mountain conditions of Subarctic and protection of the natural environment.

*Keywords*: radioisotope investigations, thorium-232, Khibiny, slushflows, Kola Peninsula, migration of radionuclides.

## REFERENCES

1. Ananyev G.S. *Katastroficheskie protsessy rel'efoobrazovaniya* [Catastrophic Geomorphic Processes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ. Publ., 1998. 102 p.
2. *Vodosnezhnye potoki Khybin* [Slushflows in Khibins]. Bozhinskii A.N., Myagkov S.M., Eds. Moscow: Geogr. Fakul'tet MGU Publ., 2001. 167 p.
3. Garankina E.V. Evolution of cryogenic microrelief of Subarctic mountains. Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2013. 206 p.
4. *Geologicheskaya karta Hibinskikh tundr. 1 : 50 000.* [Geological Map of the Khibiny Tundras]. Apatity: Geol. Sluzhba Finlyandii, Geol. Inst. KNTc RAN, 2014.
5. *Geologiya rudnykh raionov Murmanskoi oblasti* [Geology of Ore Districts in the Murmansk Region]. Pozhilenko V.I., Gavrilenko B.V., Zhirov D.V., Zhabin S.V., Eds. Apatity: Kol'skii Nauchn.Tsentr RAN, 2002. 359 p.
6. Zak S.I., Kamenev E.A., Minakov F.V., Armand A.L., Mikheichev A.S., Petersil'e I.A. *Hibinskii shchelochnyi massiv* [Khibiny Alkaline Massif]. Leningrad: Nedra Publ., 1972. 176 p.
7. Koshechkin B.I. *Tundra khranit sled* [Tundra Keeps Track]. Murmansk: Murmanskoe Knizhnoe Izdatel'stvo Publ., 1979. 152 p.
8. Krasotkin I.S., Leskov A.L., Voitsekhovsky Yu.L., Shpachenko A.K. Active Past of Hackman Canyon. In *Petrologiya i minerageniya Kol'skogo regiona. Tr. V Vserossiiskoi Fersmanovskoi nauchnoi sessii, posvyashchennoi 90-letiyu so dnya rozhdeniya d.g.-m.n. E.K. Kozlova* [Petrology and Minerageny in the Kola Region. Proceedings of the 5th All-Russian Fersman Scientific Session, Dedicated to the 90th Anniversary of E.K. Kozlov]. Apatity: Kol'skii Nauchn. Tsentr RAN Publ., 2008, pp. 44–48. (In Russ.).
9. Perov V.F. Mudflows of Khibiny Mountains. *Vestn. Mosk. Univ.. Ser. Geogr.,* 1966, no. 1, pp. 106–110. (In Russ.).
10. Perov V.F. *Selevye yavleniya. Terminologicheskii slovar'* [Mudflow Phenomena. Terminological Dictionary]. Moscow: Mosk. Gos. Univ. Publ., 1996. 34 p.
11. Rzhevskii B.N. The Circumstances and the reasons of the avalanche catastrophy in Khibins in 1935. In *Geologiya i poleznye iskopaemye Kol'skogo poluostrova. Tr. VII Vserossiiskoi Fersmanovskoi nauchnoi sessii, posvyashchennoi 80-letiyu Kol'skogo NC RAN (Apatity, 2–5 maya 2010 g.)* [Geology and Fossils of the Kola Peninsula. Proceedings of the 7th All-Russian Fersman Scientific Session, Dedicated to the 80th Anniversary of the Kola Scientific Center, RAS (2–5 May 2010)]. Apatity: K&M Publ., 2010, pp. 211–215. (In Russ.).
12. Ryabchikov D.I., Gol'braikh E.K. *Analiticheskaya khimiya toriya* [Analytical Chemistry of Thorium]. Moscow: Akad. Nauk SSSR Publ., 1960. 297 p.
13. Sapunov V.N. Slushflowsof Khibiny Mountains. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovanii,* 1991, vol. 71, pp. 94–99. (In Russ.).
14. Titaeva N.A. *Yadernaya geokhimiya* [Nuclear Geochemistry]. Moscow: Mosk. Gos. Univ. Publ., 2000. 336 p.
15. Titaeva N.A., Taskaev A.I. *Migratsiya tyazhelykh estestvennykh radionuklidov v usloviyakh gumidnoi zony* [Migration of Heavy Natural Radionuclides in the Conditions of Humid Zone]. Leningrad: Nauka Publ., 1983. 232 p.
16. Titaeva N.A., Filonov V.A., Ovchenkov V.Ja., Veksler T.I., Orlova A.V., Tyrina A.S. The behavior of uranium and thorium isotopes in thesystem ofcrystal rocks– surface warterin cold humid climate. *Geokhimiya,* 1973, no. 10, pp. 1522–1527. (In Russ.).