

# ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭКОСИСТЕМЫ

УДК 628.398:620.267(261.24)

**А.Г. Григорьев**  
**М.В. Владимиров**

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, МИГРАЦИИ И НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

*Рассмотрено влияние ряда факторов на закономерности современного распределения естественных ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) и техногенных ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) радионуклидов в осадках Балтийского моря. Результаты исследований следующие: распределение  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях обусловлено главным образом его связью с гидрослюдами, входящими в состав алевропелитовой и пелитовой фракций. При этом радиоцезий в большей степени накапливается в алевроитовой фракции. Аккумуляция  $^{226}\text{Ra}$  донными отложениями связана преимущественно со щелочным геохимическим барьером на границе вода – дно. Накопление  $^{232}\text{Th}$  происходит преимущественно в пелитовой фракции осадков. Распределение и накопление  $^{40}\text{K}$  обусловлено соотношением в донных отложениях калия, заключенного в гидрослюдистых минералах. Значимые активности  $^{60}\text{Co}$  выявлены только лишь в небольшом количестве проб.*

*This paper focuses on the impact of certain factors on the contemporary distribution of natural ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) and anthropogenic ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) radionuclides in the sediments of the Baltic Sea. The results of the study suggest that the distribution of  $^{137}\text{Cs}$  is determined by the content of hydromica of silty-clay and clay grain-size fractions, while radiocaesium is mainly accumulated by silty fractions. The accumulation of  $^{226}\text{Ra}$  by bottom sediments is mainly determined by the pH geochemical barrier at the water-seafloor boundary. The accumulation of  $^{232}\text{Th}$  occurs mainly in clayey fractions of the sediment. The distribution and accumulation of  $^{40}\text{K}$  is predominantly determined by the ratio of potassium contained in hydromica minerals. Significant  $^{60}\text{Co}$  activity was registered only in a few samples.*

**Ключевые слова:** закономерности распределения радионуклидов, Балтийское море, гидрослюды, щелочной барьер, фракции осадков, гранулометрический состав.

**Key words:** radionuclide distribution patterns, Baltic Sea, hydromica, pH barrier, sediment fractions, grain-size composition.

Изучением особенностей миграции и накопления природных и техногенных радионуклидов в подводных условиях занимался ряд исследователей. В частности, одной из основополагающих может считаться работа В.В. Громова и В.И. Спицина «Искусственные радионуклиды в морской среде» [6], посвященная миграции и сорбции техногенных радионуклидов в акваториях океанов. Большой вклад в изучение данной проблемы внесли И.Е. Старик, А.П. Лисицын, Н.М. Страхов, Г.Г. Матишев и Д.Г. Матишев, В.П. Тишков, В.В. Анисимов и многие другие. Но

эти исследователи в основном рассматривали распределение и поведение радионуклидов в океанических условиях, в обстановках больших глубин с определенными седиментационными условиями и длительными процессами миграции радионуклидов в водной среде. Условия же миграции и накопления, основных гамма-излучающих радионуклидов в донных отложениях в относительно мелководном бассейне Балтийского моря с резкими изменениями батиметрического уровня, состава донных отложений, окислительно-восстановительной и кислотно-щелочной обстановок, значительным непосредственным влиянием берегового сноса имеют специфические особенности и представляют особый интерес. Весьма важным аспектом проблемы является непосредственное влияние «чернобыльского следа» на акваторию Балтийского моря.

Авторами работы предпринята попытка рассмотреть влияние ряда факторов на условия миграции, накопления и закономерности современного распределения естественных ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) и техногенных ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) радионуклидов в осадках Балтийского моря. Использовались результаты работ в пределах типичных седиментационных бассейнов Балтики: Финскому заливу, Борнхольмской, Готландской котловинам и проливу Скагеррак.

**Общая региональная характеристика**

Распределение изучаемых изотопов по основным изученным площадям подчиняется определенной закономерности. Обобщенные статистические параметры распределения радионуклидов приведены в таблице.

**Распределение активностей гамма-излучающих радионуклидов (Бк/кг)  
в основных районах исследований**

Район	<sup>226</sup> Ra		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K		<sup>137</sup> Cs		<sup>60</sup> Co		N
	A <sub>ф</sub>	σ	A <sub>ф</sub>	σ	A <sub>ф</sub>	σ	A <sub>ф</sub>	σ	A <sub>ф</sub>	σ	
Финский залив	52	31	75	34	805	303	560	458	5	11	411
Готландская котловина	48	22	56	16	963	152	163	32	—	—	29
Борнхольмская котловина	47	19	52	11	837	143	63	39	3	2	49
Пролив Скагеррак	25	8	32	6	615	108	14	8	—	—	28

*Примечания:* 1. По Финскому заливу приводятся данные для алевропелитовых отложений в центральной и восточной частях залива. Проверки в статистических параметрах распределения <sup>60</sup>Co говорят о том, что практически все значения активности ниже предела обнаружения. 2. A<sub>ф</sub> — фоновое медианное значение распределения активностей радионуклидов, σ — стандартное отклонение, N — количество проб.

Отчетливо прослеживается закономерное уменьшение средних активностей <sup>137</sup>Cs, <sup>232</sup>Th и в меньшей степени <sup>226</sup>Ra с востока на запад в следующей последовательности: Финский залив — Готландская и Борнхольмская котловины — пролив Скагеррак. Эта закономерность в распределении <sup>137</sup>Cs связана с распространением «чернобыльского цезия» из Финского залива, над которым прошло радиоактивное облако. Что касается Th и Ra, то можно полагать, что такое региональное распределение их активностей в донных осадках в значительной степени связано с радиогеохимическими особенностями горных пород. На повышенные концентрации <sup>226</sup>Ra и <sup>232</sup>Th в донных отложениях Финского залива влияют, с одной стороны, повышенные содержания урана и радия в породах венда и ордовика южного берега залива, а с другой стороны, близость специализированных на U(Ra) и Th массивов гранитоидов юго-восточной окраины Балтийского щита [14; 15]. По мере удаления от основных источников поступления этих изотопов в морскую среду очевидно уменьшается и их концентрация в донных осадках.

Для углубленного изучения закономерностей поведения радионуклидов и их распределения в донных отложениях применялся факторный анализ методом главных компонент в R-модификации. Использовались выборки, включающие активности радионуклидов, процентные содержания различных гранулометрических фракций донных осадков, значения физико-химических параметров (pH, Eh) придонных и иловых вод, глубину бассейнов.

### **Районы Центральной и Западной Балтики (собственно Балтийское море)**

Результаты факторного анализа данных (69 станций) по собственно Балтийскому морю, в основном характеризующие его главные бассейны седиментации (Готландская и Борнхольмская котловины) и прилегающие к ним площади дна акватории, показали следующее (рис. 1).

Совместный анализ распределения факторных нагрузок, представленный на рисунке 1, позволяет выделить наличие четырех ассоциаций, тесно связанных между собой параметров.

В первую, «глубоководную», ассоциацию входят гранулометрические фракции пелитовой размерности, глубина моря и активность <sup>232</sup>Th. Во вторую, «мелководную», — входят песчаные фракции, для которых накопление радиоактивных элементов нехарактерно. В третью ассоциацию — активность <sup>137</sup>Cs, гранулометрические фракции алевритовой размерности, величина Eh. В четвертую — <sup>226</sup>Ra и pH. <sup>40</sup>K не входит ни в одну из выделенных групп, при этом в определенной степени тяготея к пелитовой и частично к алевритовой ассоциации. Таким образом, с пелитовой фракцией отчетливо связано накопление только <sup>232</sup>Th. Этот результат на первый взгляд является несколько неожиданным, поскольку обычно считается, что относительное накопление всех четырех радионуклидов характерно для пелитовой фракции.

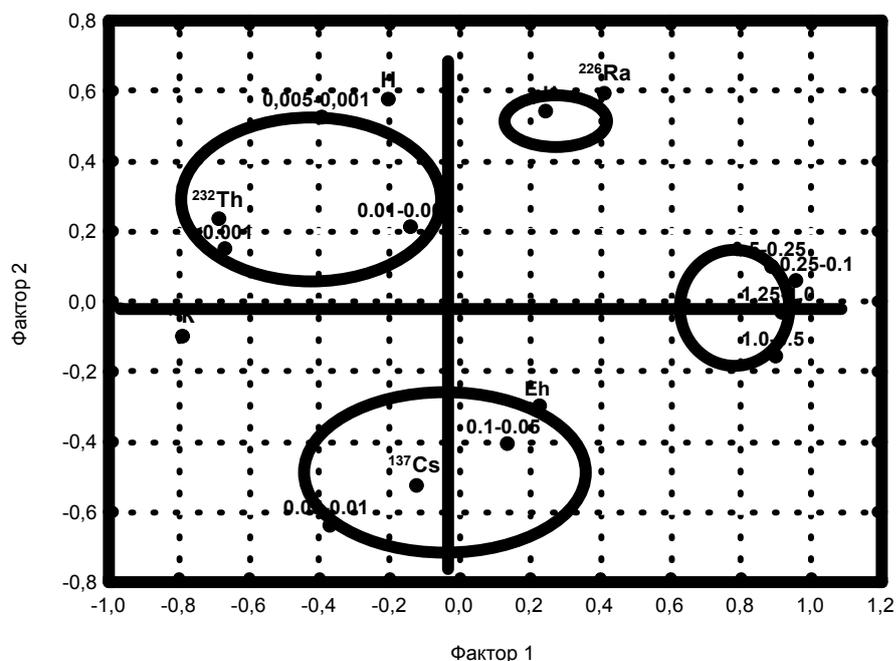


Рис. 1. Диаграмма факторных нагрузок для активностей радионуклидов, Ph, Eh, глубины, гранулометрии

*Примечание:* здесь и далее на подобных факторных диаграммах цифрами указаны гранулометрические фракции опробованных донных осадков в мм, Н — глубина моря.

Анализ полученных результатов позволяет дать следующую их интерпретацию. Тесная связь тория с пелитовой фракцией не является неожиданной. Это полностью совпадает с данными, приведенными в работе А. И. Блажчишина [2], где показано преимущественное накопление тория в пелитовой фракции донных отложений собственно Балтийского моря. Торий малоподвижен в большинстве гипергенных обстановок [11], вследствие чего его транспортировка и переотложение происходят в основном за счет механического переноса и гравитационной аккумуляции. В работе В. В. Гордеева и А. П. Лисицына [5] сделан вывод, что из общей массы тория, поступающего в бассейны осадконакопления с речным стоком, 97,5 %, находится во взвешенном состоянии. Всё вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что обогащение пелитовых осадков Балтийского моря торием происходит за счет мелкодисперсных торийсодержащих минералов, которые переносятся в водной среде в составе микроминеральной взвеси. При длительной транспортировке происходит значительная механическая переработка, что в значительной степени и объясняет его пелитовую размерность.

Распределение радия практически не связано с фракционным составом донных отложений. С другой стороны, результаты факторного анализа показывают тесную связь  $^{226}\text{Ra}$  с параметром рН. Это подтверждается результатами корреляционного анализа: в донных отложениях существует слабая, но значимая положительная корреляция ( $R=+0,36$ ) между рН поровых вод и активностью  $^{226}\text{Ra}$ , т.е. при несколько более высокой щелочности повышается концентрация радия. Как известно, радий, который относится к щелочноземельным металлам, активно мигрирует в кислых водах, а в щелочных водах растворимость соединений радия значительно ниже [7; 11]. Для щелочноземельных металлов, мигрирующих в растворах в форме простых катионов, и в частности для радия, характерна концентрация на щелочных барьерах [12]. По результатам выполненных измерений для придонных вод Балтики характерна нейтральная или слабощелочная среда: рН придонных вод колеблется в интервале 7,24—8,07 с модальным значением рН=7,4, которая в целом мало благоприятна для миграции радия. Однако в поровых водах среда еще несколько более щелочная (рН =7,6—8,5) с модальным значением рН=8,0. Таким образом, в данном случае на границе вода — дно существует слабый щелочной барьер, на котором происходит выпадение радия. При этом наибольшие концентрации радия характерны для участков с наиболее щелочными условиями.

Как считалось ранее, радиоцезий наиболее интенсивно накапливается в пелитовой фракции донных отложений [2; 6; 8—10]. Однако по результатам выполненного факторного в пределах

собственно Балтийского моря  $^{137}\text{Cs}$  наиболее тесно связан не с пелитовой, а с алевритовой фракцией 0,1—0,01 мм.

Причиной этому может служить следующее. Как показано в работах [6; 11], гидрослюды интенсивно сорбируют цезий, причем сорбция в достаточной степени является необратимой: ионы цезия, поглощаясь, образуют прочное химическое соединение, т. е. происходит хемосорбция. В то же время, как показано в работе В. Т. Флорова [17], гидрослюды во многих случаях обладают алевритовой размерностью. В работе [3] также приводятся данные о том, что гидрослюды составляют значительный процент алевритовой фракции донных отложений Балтики.

Нижняя граница распространения мелкоалевритовых илов в Балтийском море достигает глубин 110—130 м [3], т. е. алевритовые илы в основном покрывают склоны котловин. Результаты факторного анализа также показывают (см. рис. 1), что алевритовая фракция занимает промежуточное положение между мелководными и глубоководными отложениями, что подтверждает их преимущественное распространение на склонах. Входящий в одну ассоциацию с алевритовыми илами и радиоцезием окислительно-восстановительный потенциал  $E_h$  показывает, что данный материал накапливается в устойчивой окислительной обстановке, которая характерна для склонов котловин. В свою очередь, пелитовая фракция тяготеет к наиболее глубоководным участкам, т. е. ко дну котловин.

Отмеченный факт преимущественного распространения обогащенной гидрослюдами алевритовой фракции на средних глубинах склонов котловин, а пелитовой фракции, также богатой иллитом, на больших глубинах дна котловин позволяет обосновать преимущественную аккумуляцию  $^{137}\text{Cs}$  алевритовой фракцией по сравнению с пелитовой. Вероятно, произошел следующий механизм накопления радиоцезия. Вследствие аварии на Чернобыльской АЭС воды Финского залива подверглись значительному загрязнению радиоцезием, выпавшим из «чернобыльского» облака. Начиная с 1986 г. происходит вынос больших масс поверхностных вод, обогащенных радиоцезием, из Финского залива на запад и как следствие — интенсивное обогащение радиоцезием вод Центральной Балтики. При этом существует резкое различие между поверхностными и глубинными водами. Последние в значительно меньшей степени обогащены  $^{137}\text{Cs}$ , что особенно характерно для глубоководных впадин, где активность радиоцезия в придонных слоях составляет 27—32% от активности в приповерхностных слоях, что объясняется стратификацией водной толщи. Такая обстановка сохранялась до 1992 г., когда наступила стабилизация и прекратился процесс накопления радиоцезия в водах собственно Балтийского моря [1, с. 16]. Таким образом, в период максимальных концентраций радиоцезия в водах Балтики водные толщи у дна котловин содержали значительно меньше радиоцезия, чем водные толщи возле их склоновой части. Поэтому накопление  $^{137}\text{Cs}$  за счет его сорбции из воды гидрослюдами алевритовой фракции склонов превосходило его накопление за счет сорбции гидрослюдами пелитовой фракции дна котловин.

$^{40}\text{K}$  находится в равновесии с нерадиоактивным изотопом  $^{39}\text{K}$ . В работах [4; 13] показано, что самыми распространенными глинистыми минералами донных осадков Балтийского моря являются иллит и другие содержащие калий гидрослюды ( $\text{K}_{1-1,5}\text{Al}_4[\text{Si}_{7-6,5}\text{Al}_{1-1,5}\text{O}_{20}](\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Они почти нацело слагают среднепелитовую (0,005—0,001 мм) и субколлоидную ( $< 0,001$  мм) фракции [3]. С другой стороны, как отмечалось выше, гидрослюды во многих случаях обладают алевритовой размерностью, отсюда  $^{40}\text{K}$ , не входя ни в одну из выделенных групп, тяготеет как к пелитовой, так и частично к алевритовой ассоциации. Причем его более тесная связь с глубоководной пелитовой ассоциацией говорит о том, что количество гидрослюды в пелитовой фракции все же превосходит их количество в алевритовой фракции донных отложений.

### Пролив Скагеррак

Довольно интересные результаты получены в результате факторного анализа материалов по проливу Скагеррак. Анализ распределения факторных нагрузок показывает почти полное отсутствие связей между активностями радионуклидов, гранулометрическим составом донных отложений, окислительно-восстановительной и кислотно-щелочной обстановкой района исследований (рис. 2).

Таким образом, распределение радионуклидов в проливе Скагеррак крайне специфично и резко отличается от собственно Балтийского моря. Объяснить это можно следующим. Изучаемая площадь в пределах пролива Скагеррак характеризуется большими глубинами (198—220 м), при этом геоморфологические условия в пределах площади практически одинаковы [4].

Гранулометрический и литологический состав донных отложений также малоизменчив и представлен в основном пелитовой фракцией глинистых отложений [3].

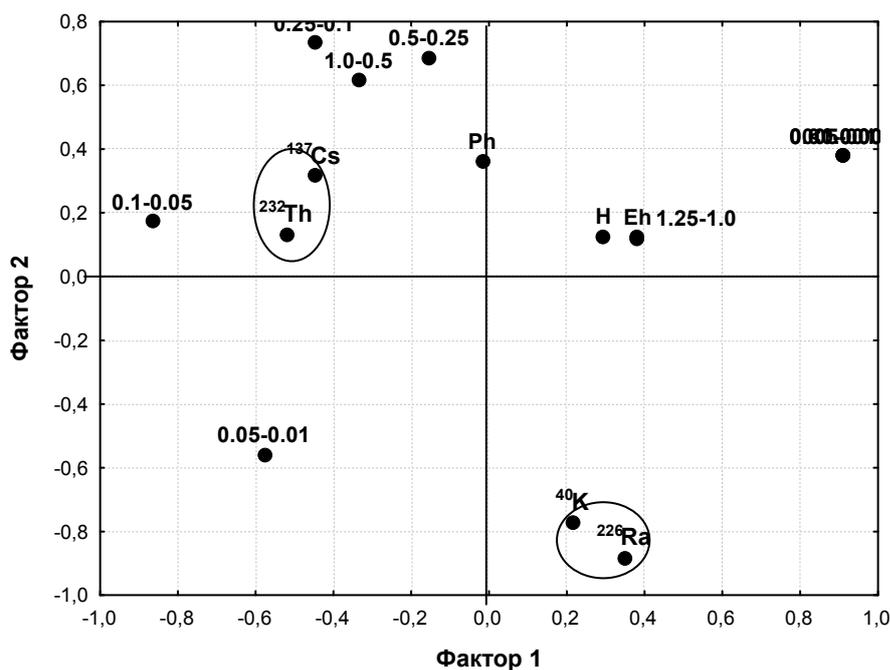


Рис. 2. Диаграмма факторных нагрузок для активностей радионуклидов, Ph, Eh, глубины, гранулометрии

Параметры Eh и pH стабильны. Концентрации радионуклидов невелики. При столь малой вариабельности основных изучаемых параметров трудно предположить обнаружение какой-либо существенной связи между ними, что и показал факторный анализ. Для пролива Скагеррак характерны мощные придонные течения, связанные с затокном вод Северного моря, — вероятно, именно этот гидродинамический фактор играет нивелирующую роль.

### Выводы

В региональном плане установлено закономерное уменьшение средних активностей  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и в меньшей степени  $^{226}\text{Ra}$  с востока на запад в типичных бассейнах седиментации в следующей последовательности: Финский залив — Готландская и Борнхольмская котловины — пролив Скагеррак. Этот тренд распределения тория и радия обусловлен региональным геолого-геохимическим фактором, а  $^{137}\text{Cs}$  — особенностями распространения “чернобыльского цезия” из Финского залива в остальные части Балтийского моря. Основные закономерности распределения и накопления  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях Балтийского моря обусловлены главным образом его связью с гидрослюдами, входящими в состав алевропелитовой и пелитовой фракций. При этом радиоцезий в большей степени накапливается в алевритовой фракции за счет его сорбции из придонных вод. Аккумуляция  $^{226}\text{Ra}$  донными отложениями связана преимущественно со щелочным геохимическим барьером на границе вода — дно. Накопление  $^{232}\text{Th}$  происходит в основном в пелитовой фракции осадков за счет мелкодисперсных торийсодержащих минералов, которые переносятся в водной среде в составе микроминеральной взвеси. Распределение и накопление  $^{40}\text{K}$  обусловлено соотношением в донных отложениях калия, заключенного в гидрослюдистых минералах. Значимые активности  $^{60}\text{Co}$  выявлены только лишь в небольшом количестве проб донных отложений, что не позволяет определить закономерности его распределения. Вероятно, отдельные значимые активности  $^{60}\text{Co}$  объясняются локальными участками загрязнения осадков этим техногенным радионуклидом.

## Список литературы

1. *Анисимов В. В., Иванова Л. М., Тишков В. П. и др.* Исследования радиоактивности Балтийского моря в 1992 г. Национальный отчет Российской Федерации. М., 1993.
2. *Блажчишин А. И., Митропольский А. Ю., Штраус А. Д.* Микроэлементы в донных осадках Балтийского моря. Киев, 1982.
3. *Геология Балтийского моря* / под ред. В. К. Гуделиса и Е. М. Емельянова. Вильнюс, 1976.
4. *Геология и геоморфология Балтийского моря. Сводная объяснительная записка к геологическим картам масштаба 1:500 000 / М-во геологии СССР, Литовский геологический ин-т; под ред. А. А. Григялиса.* Л., 1991.
5. *Гордеев В. В., Лисицин А. П.* Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов осадочным материалом // Доклады Академии наук СССР. 1978. Т. 238, № 1. С. 225—228.
6. *Громов В. В., Спицин В. И.* Искусственные радионуклиды в морской среде. М., 1975.
7. *Емельянов Е. М.* Барьерные зоны в океане. Калининград, 1998.
8. *Иванов Г. И., Грамберг И. С., Крюков В. Д.* Уровни концентрации загрязняющих веществ в придонной морской среде западно-арктического шельфа // Доклады Академии наук СССР. 1997. Т. 355, № 3. С. 365—368.
9. *Матишев Г. Г., Матишев Д. Г.* Особенности аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  различными типами донных отложений в прибрежных водах Баренцева и Карского морей // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 5. С. 540—554.
10. *Матишев Г. Г., Матишев Д. Г., Риссанен К.* Радионуклиды в экосистеме Баренцева и Карского морей. Апатиты, 1994.
11. *Перельман А. И.* Геохимия эпигенетических процессов. М., 1968.
12. *Перельман А. И.* Геохимия. М., 1989.
13. *Рябчук Д. В.* Литология верхнеплейстоценовых и голоценовых отложений северо-восточной части Финского залива: автореф. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2002.
14. *Савицкий А. В., Мельников Е. К., Титов В. В.* Пространственные закономерности в распределении тория в геологических формациях Балтийского щита // Процессы концентрации тория в земной коре: сб. науч. тр. М., 1987. С. 47—55.
15. *Смыслов А. А.* Уран и торий в земной коре. Л., 1974.
16. *Тишков В. П., Иванова Л. М., Икяхеймонен Т. К. и др.* Исследования радиоактивных веществ в Балтийском море в 1988—1989 гг. М., 1994.
17. *Флоров В. Т.* Литология. Кн. 2. М., 1993.

## Об авторах

*Григорьев Андрей Глебович*, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт.  
E-mail: [Andrey\\_Grigiryev@vsegei.ru](mailto:Andrey_Grigiryev@vsegei.ru)

*Владимиров Максим Викторович*, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель главы департамента, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.  
E-mail: [vladimirovs2001@mail.ru](mailto:vladimirovs2001@mail.ru)

## About authors

*Dr. Andrey Grigoryev*, Senior Research Fellow, All-Russian Geological Research Institute.  
E-mail: [Andrey\\_Grigiryev@vsegei.ru](mailto:Andrey_Grigiryev@vsegei.ru)

*Dr. Maxim Vladimirov*, deputy head of a department, Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters.  
E-mail: [vladimirovs2001@mail.ru](mailto:vladimirovs2001@mail.ru)