

17. Ivanova K., Stojanovska Z., Badulin V., Kunovska B., Yovcheva M. Radiological impact of surface water and sediment near uranium mining sites // *Journal of Radiological Protection*, 2015. – V. 35. – P. 819–834.
18. Manjón G., Mantero J., Vioque I., Galván J., Díaz-Francés I., García-Tenorio R. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages // *Chemosphere*, 2019. – V. 223. – P. 536–543.
19. Mishra S., Maity S., Pandit G. G. Estimation of distribution coefficient of natural radionuclides in soil around uranium mines and its effect with ionic strength of water // *Radiation Protection Dosimetry*, 2012. – V. 152. – № 1–3. – P. 229–233.
20. Novikov D. A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / F. F. Dultsev, R. M. Kamenova-Totzeva, T. V. Korneeva // *Environmental Earth Sciences*, 2021. – V. 80. – № 216.
21. Novikov D. A. Microelements in Radon Waters of the Zaelsovsky field (The Southern Part of West Siberia) / T. V. Korneeva // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. – V. 1172. – № 1. – № 012096.
22. Novikov D. A. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) / T. V. Korneeva // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. – V. 1172. – № 012096.
23. Novikov D. A. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) / F. F. Dultsev, A. V. Chernykh // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. – V. 1451. – № 012007.
24. Yamamoto M., Sakaguchi A., Kofuji H. Uranium in acidic mine drainage at the former Ogoya Mine in Ishikawa Prefecture of Japan // *J. Radioanal Nucl Chem.*, 2010. V. 283. – P. 699–705.

## РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ (ЮГ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

А. В. Таловская<sup>1</sup>, Е. Г. Язиков<sup>1</sup>, В. В. Литай<sup>1</sup>, Т. Е. Адильбаева<sup>1</sup>, Е. С. Торосян<sup>2</sup>, Н. А. Осипова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Томский политехнический университет  
Томск, Россия, talovskaya@tpu.ru*

<sup>2</sup>*Юргинский технологический институт Томского политехнического университета  
Юрга, Россия*

## RADIOCHEMICAL SPECIFIC OF AEROSOLS IN THE AREAS IMPACTED WITH THERMAL POWER PLANTS (THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA)

A. V. Talovskaya<sup>1</sup>, E. G. Yazikov<sup>1</sup>, V. V. Litay<sup>1</sup>, T. E. Adilbaeva<sup>1</sup>, E. S. Torosyan<sup>2</sup>, N. A. Osipova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Russia, talovskaya@tpu.ru*

<sup>2</sup>*Yurga Technological Institute  
Tomsk Polytechnic University, Russia*

The paper presents the results of study the radiogeochemical features of particulate matter deposited in snow cover around of thermal power plants. Instrumental neutron-activation analysis was used to study U and Th contents in the samples of particulate phase of snow. It was revealed that U and Th contents were exceeded the background values from 2 to 43 times in the samples. These results demonstrated the anthropogenic origin of the elements. It was identified that U occurred in mode of phosphates and oxides in the samples. Uranium isotopes were mainly correlated with Fe and Mg oxides and insoluble fractions.

### Введение

Загрязнение атмосферного воздуха в значительной мере связано с развитием энергетики. Теплоэлектростанции (ТЭС) в городских и сельских поселениях являются одними из главных техногенных источников загрязнения. На территориях, прилегаю-

щих к ТЭС, уровни концентрации газовых и твердых выбросов часто превышают нормативные показатели. Среди выбросов ТЭС, преобладают выбросы от энергетических установок, использующих уголь. Экологические проблемы угольной энергетики связаны с присутствием в углях токсичных химических элементов, а также радиоактивных – урана и тория.

Эти элементы выбрасываются в атмосферный воздух в составе мелких и ультрамелких частиц, переносятся на большие расстояния и вовлекаются в геохимические циклы веществ [8, 12, 16].

В Западной Сибири сосредоточены ТЭС, использующие преимущественно уголь в своей топливной структуре. Один из крупнейших в стране и в мире угледобывающих районов – Кузнецкий угольный бассейн – расположен в Кемеровской области. Эти угли в основном используются на ТЭС юга Западной Сибири. Угли при этом характеризуются редкометалльной и радиоактивной геохимической специализацией [1–2, 4, 7]. Поэтому при сжигании углей может происходить антропогенная эмиссия элементов-примесей в окружающую среду. В результате формируются техногенные геохимические поля выпадений радиоактивных элементов в окрестностях ТЭС, которые необходимо детально изучать.

В данной работе представлены исследования уровня антропогенного загрязнения радиоактивными элементами (уран и торий) в зоне воздействия разных ТЭС юга Западной Сибири по результатам изучения состава снегового покрова как планшета-накопителя аэрозольных выпадений.

### Материалы и методы

Объектами исследования были выбраны ТЭС, расположенные в городах юга Западной Сибири – в Омске, Томске, Северске, Кемерово и Юрге, а также в Центральном Казахстане – Караганде. На ТЭЦ Омска и Караганды используют угли Экибастузского бассейна, а на других изучаемых объектах – угли Кузнецкого бассейна. Отбор проб осуществляли на расстоянии от 0,5 до 4,5 км от источников загрязнения в направлении главенствующего ветра (юг-юго-западное). Кроме того, исследования проводили в зоне воздействия котельных, использующие уголь, природный газ и древесину, расположенные в сельских населенных пунктах Томской области. Для сравнения проведен отбор проб в зонах воздействия угледобывающих предприятий и других промышленных производств в городах.

Для отбора и подготовки проб снегового покрова использовали стандартную методику [5–6] с учетом нашего [13–15] многолетнего практического опыта эколого-геохимических исследований на территории юга Западной Сибири. Пробы отбирали из шурфа на всю мощность снегового покрова, за исключением 5-сантиметрового слоя над почвой. Вес каждой пробы достигал 16–17 кг. После отбора пробы замеряли площадь шурфа и фиксировали дату отбора. Таяние проб снега осуществляли при комнатной температуре. Талую снеговую воду фильтровали через бумажный фильтр типа «синяя лента». Полученный после фильтрации твердый осадок из снеговой пробы высушивали, просеивали с выделением фракции менее 1 мм, а затем взвешивали.

Все пробы твердого осадка снега и пробы золы уноса с некоторых изучаемых ТЭС были проанализированы инструментальным нейтронно-активационным анализом на содержание (концентрация, мг/кг) 28 химических элементов, включая уран и торий, в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории, функционирующей на базе исследовательского ядерного реактора при Томском политехническом университете (аналитики: А. Ф. Судыко, Л. В. Богутская). Анализ отдельных микрочастиц в пробах выполнялся на сканирующем электронном микроскопе (Hitachi S-3400N с ЭДС BrukerXFlash 4010) в лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ (консультант: к.г.-м.н., ассистент Ильенок С. С.).

На основе полученной информацией рассчитывали коэффициент концентрации согласно методическим работам [5–6] относительно фона, данные по которому опубликованы в работах [10, 13–15], а также наших данных для района расположения Обсерватория «Фоновая» ИОА СО РАН. Статистический анализ данных содержания элементов в пробах выполнялся в программе «Statistica».

### Результаты и их обсуждение

В пробах твердого осадка снега из зон воздействия изучаемых ТЭС средние значения концентрации урана изменяются от 1,9 до 8,7 мг/кг, что соответствует коэффициентам концентрации относительно фона из работ [12–13] – от 9 до 43, а тория – от 4,6 до 15,6 мг/кг, превышающие фон от 1,5 до 5 раз (табл. 1). В сравнении с фоном обсерватория «Фоновая» содержание урана изменяется от 1,6 до 4,5 фонов, а тория – от 1,5 до 3 фонов. Для всех изучаемых проб характерна техногенная радиогеохимическая специализация. Статистически значимые высокие значения концентраций радиоактивных элементов определены для проб из района расположения ТЭЦ в Юрге и в Северске относительно данных для других изучаемых объектов. В районе ТЭЦ Юрги эта особенность может быть связана с использованием углей, которые обогащены радиоактивными элементами [1, 7]. В окрестностях ТЭС г. Северск повышенные уровни накопления радиоактивных элементов в пробах возможно еще за счет наложения техногенного геохимического воздействия расположенного вблизи предприятия ядерно-топливного цикла. Пробы из зоны воздействия ГРЭС в Томске отличаются пониженными значениями радиоактивных элементов, что может быть связано с использованием в топливном балансе кроме угля еще и природного газа. Также нами обнаружены высокие уровни накопления относительно фона урана и тория в пробах из зоны воздействия сельских котельных, работающие на углях.

Выявлены наиболее высокие концентрации урана и тория в пробах из окрестностей ТЭС, использующие угли Кузнецкого бассейна, в сравнении с

результатами исследования проб их районов расположения ТЭЦ, где сжигаются угли Экибастузского бассейна. Эта тенденция также хорошо прослеживается по значениям отношения тория к урану в пробах.

Важным индикаторным показателем для типизации территорий является отношения тория к урану (Th/U) [9–10, 14–15]. По значениям Th/U отношения в пробах твердого осадка снега, ТЭС и другие промышленные объекты можно объединить в четыре области (рис. 1).

Для первой области (I) отношение Th/U близко к 1 единице и ниже, что свидетельствует о урановой природе. В этой области сосредоточены промышленные районы, в производстве которых отмечаются повышенные концентрации урана. Среди них выделяется промышленная зона с редкометалльным производством в г. Усть-Каменогорск (Восточный Казахстан), представленная Ульбинским комбинатом. Эту область также составляет зола уноса с ГРЭС (г. Кемерово).

Для второй области (II) величина Th/U изменяется от 1 до 2 единиц. В эту область включены пробы из зоны воздействия ТЭЦ (г. Юрга), сельских угольных котельных (Томская область), угольной шахты (г. Черногорск). В эту группу также входит НПЗ (г. Ачинск [11]), что обусловлено пониженным содержанием радиоактивных элементов в пробах. В этой области также находятся угли Кузнецкого бассейна [1].

Для третьей области (III) величина Th/U изменяется от 2 до 5 единиц, указывая на смешенную природу поступления радиоактивных элементов. В этой группе сосредоточены в основном изучаемые объекты ТЭС (гг. Омск, Томск, Северск, Кемерово, Караганда), а также в г. Новосибирск [3], котельные, использующие древесину и природный газ (Томская область), угледобывающие предприятия (гг. Междуреченск, Киселевск), ядерно-топливный цикл (г. Северск) и кирпичные заводы (г. Томск). В этой области

**Таблица 1.** Содержание радиоактивных элементов и торий-урановое отношение в пробах твердого осадка снега в районах размещения предприятий теплоэнергетики на юге Западной Сибири

Предприятия теплоэнергетики	Диапазон содержаний*, мг/кг		Th/U	Средние значения коэффициентов концентрации относительно фона [10, 13–15]	
	U	Th		U	Th
ТЭЦ-5 г. Омск	$\frac{3,2}{2,8 - 4,2}$ 12	$\frac{8,5}{7,6 - 10,6}$ 12	2,6	16,0	2,9
ГРЭС-2 г. Мыски	$\frac{5,1}{2,1 - 8,2}$ 20	$\frac{11,9}{5,1 - 18,4}$ 20	2,3	25,5	4,1
ТЭЦ г. Северск	$\frac{6,9}{3,6 - 10,1}$ 14	$\frac{15,6}{7,2 - 19,6}$ 14	2,3	34,5	5,4
ГРЭС-2 г. Томск	$\frac{3,9}{1,4 - 7,9}$ 69	$\frac{7,8}{2,4 - 13,2}$ 69	2,0	19,5	2,7
ГРЭС г. Кемерово	$\frac{4,8}{3,3 - 6,9}$ 9	$\frac{14,3}{8,8 - 18,1}$ 9	2,9	24,0	4,9
ТЭЦ г. Юрга	$\frac{8,7}{7,5 - 8,1}$ 7	$\frac{15,6}{12,5 - 17,5}$ 7	1,8	43,5	5,4
ТЭЦ г. Караганда	$\frac{1,9}{0,7 - 2,9}$ 18	$\frac{4,6}{2,9 - 5,6}$ 18	2,4	9,5	1,6
Котельные на угле**	$\frac{6,1}{2,3 - 7,1}$ 26	$\frac{8,6}{4,3 - 14,9}$ 26	1,4	30,5	2,9
Котельные на древесине**	$\frac{1,1}{0,6 - 1,1}$ 5	$\frac{2,9}{1,5 - 4,8}$ 5	2,6	5,5	1,0
Котельные на природном газе**	$\frac{2,3}{0,4 - 3,2}$ 11	$\frac{4,6}{1,4 - 6,6}$ 11	2,0	11,5	1,6
Региональный фон [10, 13–15]	0,2	2,9	14,5	–	–
Фон – Обсерватория «Фонная» ИОА СО РАН	1,9	5,5	2,9	–	–

\* – в числителе – среднее, знаменателе – минимально-максимальное значение и количество проб; \*\* – сельские населенные пункты Томской обл.

также сосредоточены зола уноса и угли с изучаемых ТЭС, что указывает на источники поступления радиоактивных элементов в районах размещения ТЭС.

Для четвертой области (IV) отношение Th/U составляет более 5 единиц, что свидетельствует о ториевой природе. Для этой группы характерны низкие концентрации урана. Такие значения торий-уранового отношения характеризуют фоновый район для Западно-Сибирского региона [10, 13–15].

По результатам изучения проб на сканирующем электронном микроскопе выявлены твердофазные формы нахождения урана, представленные U-содержащими частицами (рис. 2). В пробах из района расположения угольных объектов теплоэнергетики (ТЭС и угольные котельные), использующие кузнецкие угли, U-содержащие частицы представлены в виде оксидов урана (рис. 2). Микрофазы фосфатов

урана характерны для проб, отобранных в окрестностях ТЭС, где применяется экибастузский уголь. Торий выявлен в виде примеси в составе частиц, содержащие фосфаты редкоземельных элементов.

На примере ГРЭС (г. Томск), где используются угли Кузнецкого бассейна и природный газ, нами были изучены формы нахождения урана и трансурановых элементов в пробах твердого осадка снега. С помощью метода f-радиографии в пробах выявлена молекулярно-рассеянная форма радионуклидов, представленная на детекторе в виде распределения единичных треков от осколков деления радионуклидов [13]. Выявлены высокие значения (5788 трек/мм<sup>2</sup>) плотности единичных треков от осколков деления радионуклидов на детекторе в сравнении с фоновыми значениями (1146–1588 трек/мм<sup>2</sup>) и для проб из районов г. Томск (1792–2835 трек/мм<sup>2</sup>), не

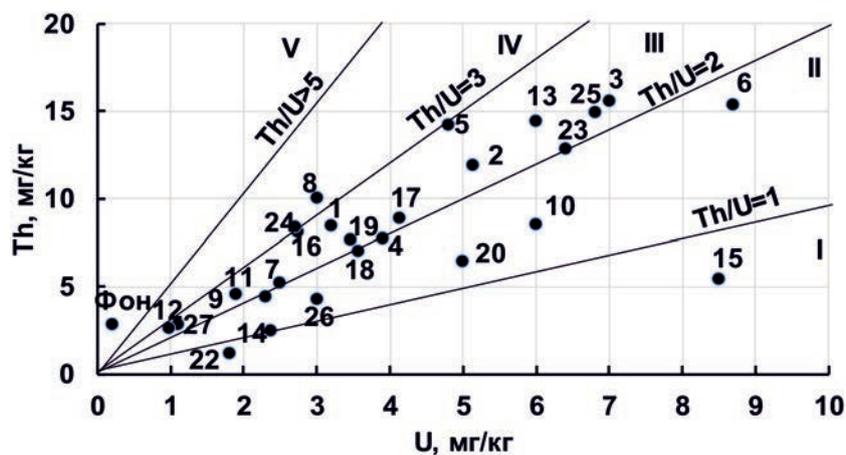


Рис. 1. Радиогеохимическая типизация твердого осадка снегового покрова в районах размещения предприятий теплоэнергетики на юге Западной Сибири

(1–9 – ТЭС: 1 – ТЭЦ-5 г. Омск; 2 – ГРЭС г. Мыски; 3 – ТЭЦ г. Северск; 4 – ГРЭС-2 г. Томск; 5 – ГРЭС г. Кемерово; 6 – ТЭЦ г. Юрга; 7 – ТЭЦ-3 г. Новосибирск [3]; 8 – ТЭЦ-2 г. Новосибирск [3]; 9 – ТЭЦ г. Караганда; 10–12 – котельные Томская область: 10 – котельные на угле; 11 – котельные на природном газе; 12 – котельные на древесине; 13–20 – предприятия: 13 – ЯТЦ (г. Северск); 14 – НПЗ (г. Ачинск [11]); 15 – промзона (г. Усть-Каменогорск); 16 – кирпичный завод (г. Томск); 17 – угольный разрез (г. Междуреченск); 18 – угольная шахта (г. Междуреченск); 19 – угольный разрез (г. Киселевск); 20 – угольная шахта (г. Черногорск); 22–25 – зола-уноса ТЭС; 22 – с ГРЭС г. Кемерово; 23 – с ГРЭС г. Томск; 24 – с ТЭЦ г. Караганда; 25 – с ТЭЦ г. Северск; 26 – кузнецкий уголь [1]; 27 – экибастузский уголь [1–2]; фон – [10, 13–15].

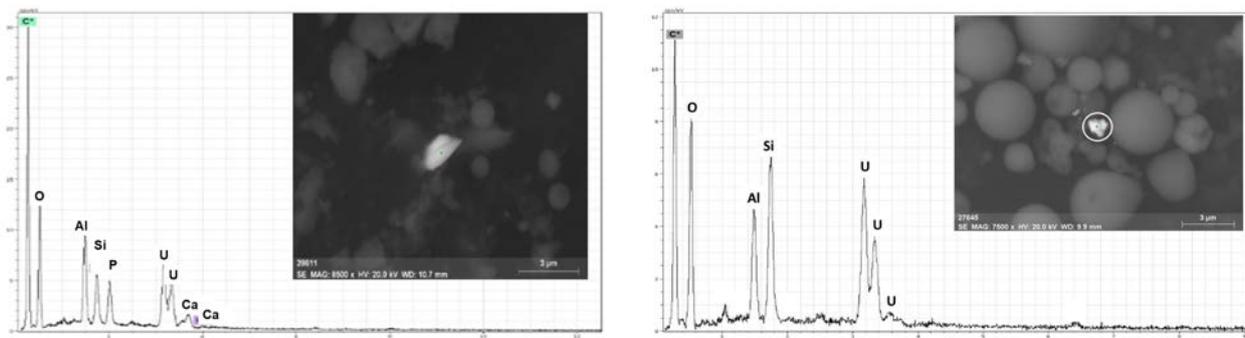


Рис. 2. Микрофотографии и энергодисперсионные спектры уран-содержащих микрофаз в пробах твердого осадка снега из зоны воздействия объектов теплоэнергетики, использующих уголь: а) в форме фосфатов; б) в форме оксидов (данные сканирующей электронной микроскопии)

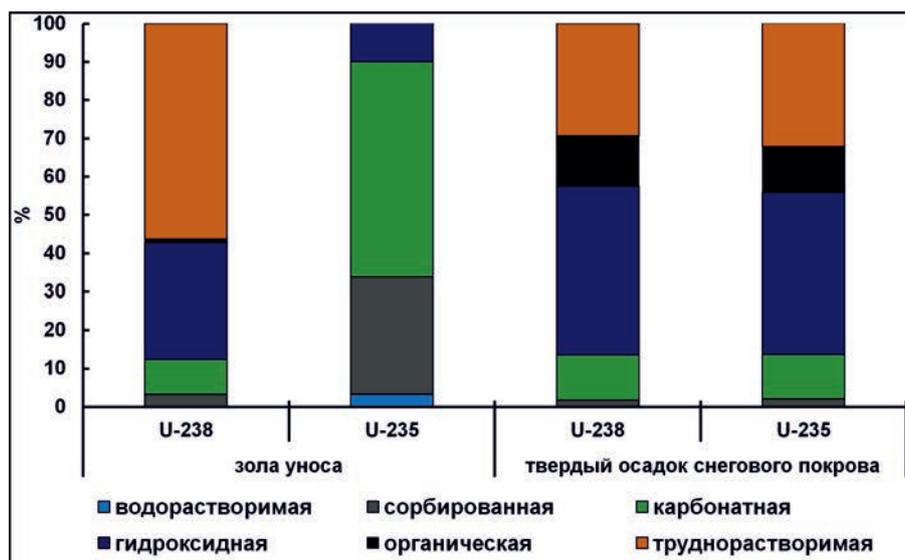


Рис. 3. Формы нахождения изотопов урана-238 и урана-235 в твердом осадке снега из района расположения ТЭС и золе уноса

подвергаемых воздействию ТЭС, а также для проб из г. Междуреченск ( $1350 \text{ трек/мм}^2$ ), где функционируют угледобывающие предприятия [13].

В пробах из ближней зоны воздействия ГРЭС г. Томск (до 1 км) и в зоне уноса этой ГРЭС определены долевые соотношения различных фракций изотопов урана-238 и урана-235 методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в вытяжках, полученных последовательным экстрагированием химическими растворами (Радиоэкологический центр, Норвегия). В результате определено, что в пробах твердого осадка снега основная доля  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  ассоциирована с оксидами железа и марганца (около 40 %) и трудно-растворимыми соединениями (около 30 %), а с карбонатными и органическими – около 10 % (рис. 3).

Это соотношение отличается от золы уноса, в которой  $^{238}\text{U}$  связан в основном с труднорастворимыми соединениями (56 %), а  $^{235}\text{U}$  – с карбонатными (56 %). В золе уноса  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  также находятся с оксидами железа и марганца – 30 и 42 %, соответственно.

### Заключение

Таким образом, по данным изучения радиохимических особенностей твердого осадка снега в районах расположения ТЭС и угледобывающих предприятий на юге Западной Сибири и в Центральном Казахстане отмечается преимущественно смешанная

природа поступления радиоактивных элементов. В пробах твердого осадка снега из зоны воздействия ТЭС, использующие кузнецкие угли, выявлены наиболее высокие концентрации урана и тория в сравнении с результатами исследования проб их районов расположения ТЭС, где сжигаются экибастузские угли. Близкие уровни накопления радиоактивных элементов, а также величины Th/U отношения в пробах и золе уноса указывают на источники поступления этих элементов как сжигание угля. В пробах выявлены частицы, содержащие уран в форме оксидов и фосфатов. На примере одной из изученных ГРЭС выявлено, что уран и трансурановые элементы в пробах находятся в молекулярно-рассеянной форме, а изотопы урана-235 и урана-238 в основном связаны с оксидами железа и марганца, труднорастворимыми соединениями. Установленные радиохимические особенности проб твердого осадка снега в районах расположения изученных ТЭС можно рассматривать как индикаторы техногенного воздействия объектов теплоэнергетики, использующие уголь в технологическом процессе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 20-05-00675 А и № 16-45-700184 р\_а. Исследования выполнены в НИ ТПУ в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

### Литература

1. Арбузов С. И. Геохимия редких элементов в углях Сибири / С. И. Арбузов, В. В. Ершов. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
2. Арбузов С. И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
3. Артамонова С. Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2020. – Т. 331 – № 7. – С. 212–223.

4. Волостнов А. В., Арбузов С. И. Токсичные элементы в углях Сибири // Энергетик, 2011. – № 3. – С. 39–44.
5. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
6. Касимов Н. С. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы / Н. С. Касимов, Н. Е. Кошелева, Д. В. Власов, Е. В. Терская // Вестн. Моск. ун-та, сер. 5. География, 2012. – № 4. – С. 14–24.
7. Нифантов Б. Ф. Угли Кузбасса: химические элементы-примеси и технологии их извлечения при комплексном освоении месторождений / Б. Ф. Нифантов В. П. Потапов, Б. А. Анфёров, Л. В. Кузнецова. – Кемерово: ИУ СО РАН, 2011. – 310 с.
8. Ревич Б. А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения // Проблемы прогнозирования, 2010. – № 4. – С. 87–99.
9. Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л. П. Рихванов, С. И. Арбузов, Н. В. Барановская, А. В. Волостнов, Т. А. Архангельская, А. М. Межибор, В. В. Берчук, Л. В. Жорняк, Ю. Л. Замятина, А. Ю. Иванов, А. В. Таловская, С. С. Шатилова, Е. Г. Язиков // Известия ТПУ, 2007. – Т. 311 – № 1. – С. 128–136.
10. Шатилов А. Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2001. – 205 с.
11. Шахова Т. С. Влияние нефтеперерабатывающих заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий по данным изучения снежного покрова (на примере гг. Омск, Ачинск, Павлодар): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
12. Юдович Я. Э. Токсичные элементы-примеси в углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 655 с.
13. Язиков Е. Г. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв: монография / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Л. В. Жорняк. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 264 с.
14. Язиков Е. Г. Радиоактивные элементы в атмосферных выпадениях снежного покрова урбанизированных территориях / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Е. А. Филимоненко, В. В. Литау, Т. Е. Адильбаева, Т. С. Шахова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск, 2016. – С. 747–751.
15. Язиков Е. Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. ... докт. геолого-минерал. наук. – Томск, 2006. – 423 с.
16. Russell M. C. The impact of three recent coal-fired power plant closings on Pittsburgh air quality: a natural experiment / M. C. Russell, J. H. Belle, Y. Liu // Journal of the Air & Waste Management Association, 2017. – V. 67. – № 1. – P. 3–16.