

## Экспериментальные и численные исследования длительного загрязнения снегового покрова ураном и торием в окрестностях теплоэлектростанции (на примере Томской ГРЭС-2)

А.В. Таловская<sup>1</sup>, В.Ф. Рапута<sup>2</sup>, Е.А. Филимоненко<sup>1</sup>, Е.Г. Язиков<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

Поступила в редакцию 24.01.2013 г.

Обсуждаются результаты полевых, химико-аналитических исследований и численного анализа процессов оседания пылеаэрозолей в зоне интенсивного воздействия выбросов Томской ГРЭС-2 в зимние периоды с 2009 по 2012 г. В рамках модели реконструкции поля выпадений монодисперсной примеси от точечного источника проведена интерпретация данных наблюдений содержания в снеге твердого осадка, урана, тория в направлении маршрута отбора проб. Показано, что наиболее значительные выпадения этих примесей происходят в ближайшей окрестности высотных труб станции в составе крупных фракций частиц.

*Ключевые слова:* пылевые атмосферные выпадения, теплоэлектростанция, снег, уран, торий, математическое моделирование, монодисперсная модель; atmospheric dust deposition, thermal power plant, snow, uranium, thorium, mathematical modeling, model monodisperse.

### Введение

При проведении экологических исследований в городах особый интерес представляет оценка степени загрязнения приземного слоя атмосферы антропогенными аэрозолями, содержащими широкий спектр токсичных примесей. В каждом городе присутствуют объекты теплоэнергетики, выбросы которых формируют обширные поля выпадения твердых частиц аэрозолей (пылевой аэрозоль) промышленно-урбанизированных центров. Локальные загрязнения могут представлять серьезную опасность для здоровья людей, проживающих в этих районах. В связи с этим определение качественных и количественных характеристик антропогенного аэрозоля, а также изучение механизмов их переноса в атмосфере приобретают существенное значение [1].

В практике мониторинга урбанизированных территорий широко используется снеговой покров как природный планшет-накопитель аэрозолей. Кроме того, он является одним из наиболее надежных индикаторов техногенного загрязнения атмосферного воздуха города [2–6]. В то же время для более полной количественной интерпретации получаемой экс-

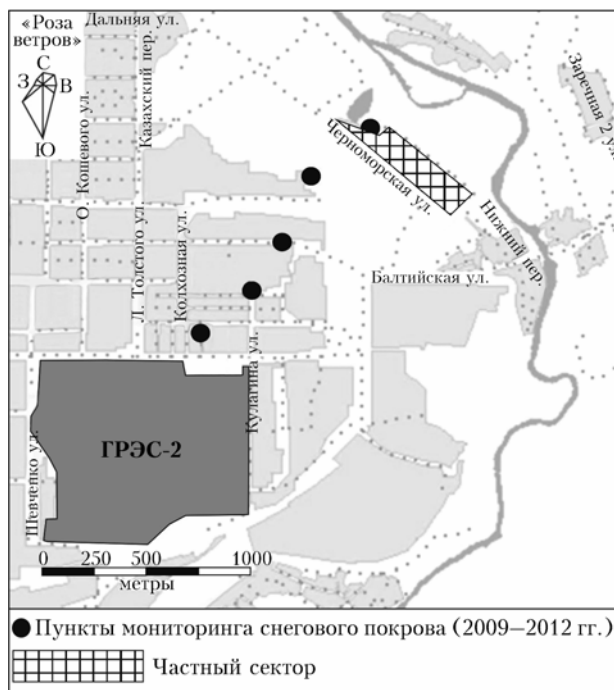
периментальной информации необходимо привлекать методы математического моделирования [7–10].

По данным Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, в г. Томске наибольший вклад (67%) в общий объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от всех стационарных источников вносят предприятия нефтехимической отрасли (ООО «Томскнефтехим», ЗАО «Метанол») и теплоэнергетики, в первую очередь Томская ГРЭС-2. В своем технологическом процессе данная теплоэлектростанция использует уголь Кузбасского бассейна и природный газ [11].

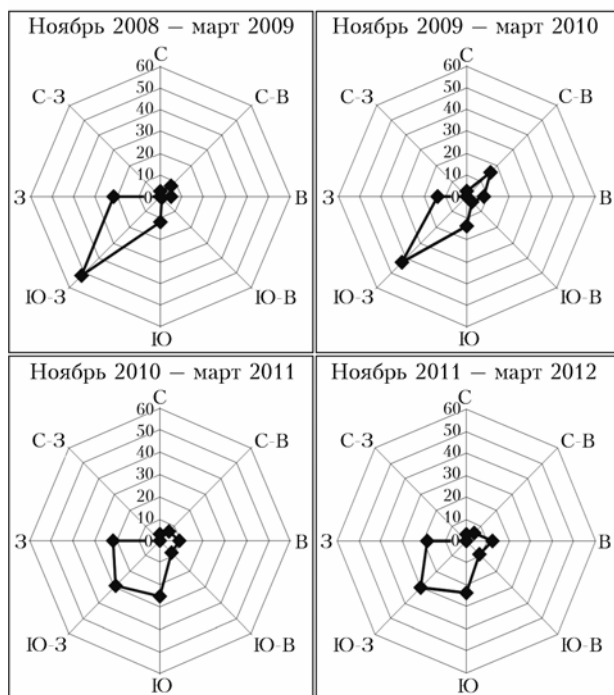
### Полевые исследования

В зимнее время, согласно климатическим данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, основной вынос атмосферных выбросов примесей от атмосферных источников г. Томска происходит в северном, северо-восточном направлениях. Выброс газоаэрозольной примеси от Томской ГРЭС-2 производится через две стометровые трубы. В конце зимних сезонов 2009–2012 гг. в зоне воздействия ГРЭС-2 выполнялся маршрутный отбор снеговых проб по векторной сети в северо-восточном направлении на расстояниях 0,73; 1,0; 1,3; 1,6 и 2,0 км от труб (рис. 1, а). «Розы ветров», соответствующие конкретным зимним сезонам, представлены на рис. 1, б.

\* Анна Валерьевна Таловская (talovskaj@yandex.ru); Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Екатерина Анатольевна Филимоненко (fili.008@mail.ru); Егор Григорьевич Язиков (yazikov@tpu.ru).



а



б

Рис. 1. Схема маршрута отбора снега (а); «розы ветров» в зимних сезонах 2008/09–2011/12 гг. (б)

Работы по отбору и подготовке снеговых проб выполняли с учетом методических рекомендаций, приводимых в работах [2–6], и на основе многолетнего практического опыта эколога-геохимических исследований на территории Западной Сибири [7–9, 11–16].

Отбор проб снега осуществляли из шурфа на всю мощность снегового покрова, за исключением 5-см слоя над почвой. При отборе проб замеряли пло-

щадь и глубину шурфа, а также фиксировали время (в сут) от начала снегостава до даты отбора. Масса каждой снеговой пробы достигала 17–20 кг. Таяние проб снега происходило при комнатной температуре. Снеготалую воду фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента». Полученный после фильтрации твердый осадок из снеговой пробы высушивали и просеивали с выделением фракции менее 1 мм, затем отправляли на анализ.

## Химико-аналитические исследования

Содержание химических элементов в пробах твердого осадка снега определяли инструментальным нейтронно-активационным анализом в аттестованной ядерно-геохимической лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ (аналитики А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). Анализ проб выполнялся согласно инструкции НСАМ ВИМС № 410-ЯФ с облучением тепловыми нейтронами на исследовательском реакторе ИРТ-Т. (Погрешность анализа в пределах 10–15%.)

## Анализ результатов наблюдения

Согласно [3, 5] проводили расчет пылевой нагрузки  $P_n = P_o/St$ , где  $P_n$  – пылевая нагрузка,  $mg/(m^2 \cdot сут)$ , или  $kg/(km^2 \cdot сут)$ ;  $P_o$  – масса пыли в пробе (мг; кг);  $S$  – площадь шурфа ( $m^2$ ;  $km^2$ );  $t$  – время от даты снегостава до даты отбора пробы (сут).

Согласно нормативным показателям [3, 5] величина пылевой нагрузки в окрестностях Томской ГРЭС-2 в течение периода наблюдений соответствует низкой степени загрязнения (менее  $250 mg/(m^2 \cdot сут)$ ) (таблица [15]).

В зоне воздействия Томской ГРЭС-2 за весь период наблюдения сохраняется тенденция превышения величины пылевой нагрузки над фоном от 7 до 30 раз [15]. По результатам проведенных исследований было установлено снижение уровня пылевого загрязнения с 2009 по 2012 г. в окрестностях теплоэлектростанции в среднем на 45% (со 115 до  $53 mg/(m^2 \cdot сут)$ ) при фоне  $7 mg/(m^2 \cdot сут)$  [16], несмотря на то что объем сжигаемого угля на станции за последние 5 лет увеличился и основная доля угля (до 80–90%) сжигалась в зимний период с ноября по март. Ранее в работе [15] снижение величины пылевого загрязнения объяснялось тем, что по официальным данным в 2010 г. на станции выполнена реконструкция существующей золоулавливающей установки одного из котлов, а также установлены два дополнительных золоуловителя. К тому же на Томской ГРЭС-2 ежегодно производятся ремонт и наладка золоуловителей с целью повышения степени очистки пылевых выбросов, что приводит к практически полному улавливанию фракций крупных частиц.

В течение периода наблюдения нами также было отмечено, что с 2009 по 2011 г. максимальное выпадение пыли на снеговой покров наблюдается на

**Величина пылевой нагрузки (мг/(м<sup>2</sup>·сут)), содержания урана и тория (мг/кг)  
в пылевом аэрозоле в зоне воздействия Томской ГРЭС-2 по данным  
снегехимического опробования 2009–2012 гг. и доля использования  
угля и газа на теплоэлектростанции**

Расстояние, км	2008/09 г. [15]			2009/10 г. [15]			2010/11 г. [15]			2011/12 г.		
	<i>P<sub>п</sub></i>	U	Th	<i>P<sub>п</sub></i>	U	Th	<i>P<sub>п</sub></i>	U	Th	<i>P<sub>п</sub></i>	U	Th
0,73	152	4,69	10,1	99	3,5	8,0	100	3,71	8,51	81	4,04	8,20
1,0	219	6,10	11,5	162	3,0	10,2	131	4,16	8,97	36	5,06	9,57
1,3	84	3,87	7,8	53	3,6	7,9	66	3,77	7,78	20	4,92	10,79
1,6	70	3,51	6,9	70	4,3	9,9	65	2,72	5,35	91	2,27	6,07
2,0	52	1,37	2,4	65	4,6	11,0	48	3,44	7,78	39	5,32	12,09
Доля угля/газа, %*	39,6/60,4			41/59			47,6/52,4			35,2/64,8		

\* Среднее значение с ноября по март (данные предоставлены А.С. Гавриленко, инженером-экологом ПТО СП ГРЭС-2 ТФ ОАО «ТГК-11»). Фон: пылевая нагрузка 7 мг/(м<sup>2</sup>·сут); уран 0,2 мг/кг; торий 2,9 мг/кг [16].

удалении 1 км, что указывает на существенное присутствие достаточно крупных частиц в дымовом факеле ГРЭС со скоростями оседания, достигающими нескольких десятков см/с. Приближенные оценки столь высоких скоростей оседания вытекают из простых кинематических соображений. Например, при средней скорости ветра 10 м/с частица должна пролететь расстояние 1 км всего за 100 с и за это же время долететь до поверхности земли с высоты 100 м.

Появление столь крупных частиц вполне может быть обусловлено процессами вымывания более мелких частиц золы ледяной крупой, образующейся при замерзании водяного пара в дымовой струе теплоэлектростанции. Данный эффект был исследован и подтвержден в работе [17] на примере угольной ТЭС г. Кызыла Красноярского края. В связи с этим явлением большая часть пылевых выбросов в зимнее время может осаждаться на довольно близких расстояниях от электростанции, несмотря на значительную высоту труб.

Следует также отметить, что в 2011 и 2012 гг. несколько изменилась структура «розы ветров» – количество юго-западных ветров сократилось на 20%, при этом количество южных ветров возросло на 18–20%, что, возможно, нашло свое отражение в некоторых колебаниях величины пылевой нагрузки в пунктах мониторинга, расположенных в северо-восточном направлении от труб теплоэлектростанции.

Анализ усредненных по всем отобраным пробам содержаний химических элементов показал, что концентрация урана превышает фон в 19,5 раза, тория – в 2,9 раза. Как известно [5], превышение содержания элемента в природных средах над фоном в 3 раза и более свидетельствует о локальном антропогенном источнике его поступления.

В 2009 г. четко прослеживается тенденция убывания содержания радиоактивных элементов в пылевом аэрозоле по мере удаления от теплоэлектростанции. В 2010 г. было зафиксировано увеличение концентраций урана и тория в твердом осадке снега на более дальних расстояниях от Томской ГРЭС-2 (1,6–2,0 км) на 20–30% по сравнению с таковыми в ближней зоне. В зимние сезоны 2010/2011 и 2011/

/2012 гг. на расстоянии от 0,73 до 1,3 км от труб теплоэлектростанции распределение радиоактивных элементов в пылевых аэрозолях существенно не изменяется – на уровне 19–23 фонов для урана и трех для тория. На удалении 1,6 км от труб наблюдается снижение концентраций радиоактивных элементов в осадке на 30–50% с последующим пиком содержания на расстоянии 2 км.

Численная интерпретация полученных экспериментальных данных выпадений пыли, урана и тория в окрестностях Томской ГРЭС-2 в направлении маршрута отбора проб была проведена с помощью монодисперсной модели реконструкции полей от стационарных источников. Данная модель вполне применима в сравнительно небольших диапазонах расстояний от источника, достаточно апробирована, запатентована и оформлена в виде комплекса программ [18].

Для восстановления по данным наблюдений плотности выпадений  $q(r, \varphi)$  использовалось следующее регрессионное соотношение [7]:

$$q(r, \varphi, \theta) = \theta_1 P(\varphi + 180^\circ) r^{\theta_3} e^{-\theta_2/r}, \quad (1)$$

где  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – неизвестные параметры, подлежащие оцениванию по данным наблюдений;  $P(\varphi)$  – приземная «роза ветров».

Для определения вектора параметров  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  в соотношении (1) необходимо проведение измерений плотности выпадений не менее чем в трех точках местности. (Оценивание неизвестных параметров можно провести поэтапно, если учесть, что параметр  $\theta_2 = 2r_{\max}$ , где  $r_{\max}$  – расстояние от трубы, на котором достигается максимальная приземная концентрация легкой примеси. Величина  $r_{\max}$  в определенном смысле является внешним параметром и его предварительную оценку следует выполнить отдельно, исходя из геометрической высоты источника, динамических и тепловых характеристик выбираемой в атмосферу газовой смеси. Оценка  $r_{\max}$  в данном случае может составить 2,0–2,5 км.)

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 2, показывает, что в целом предложенная модель вполне удовлетворительно описывает поля выпадений урана и тория на снеговой покров

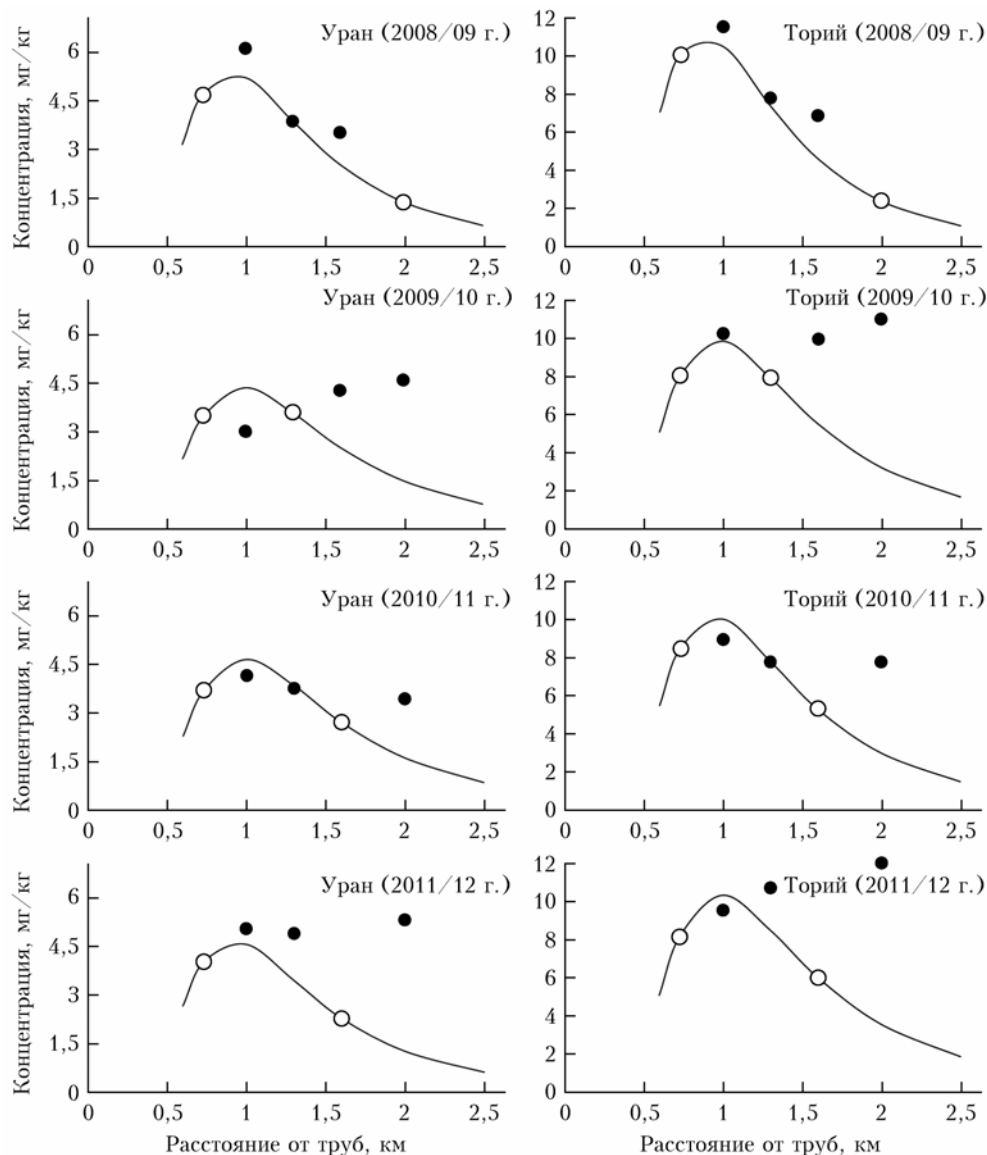


Рис. 2. Численно восстановленные по данным наблюдений поля выпадений на снеговой покров урана, тория (мг/кг) в составе атмосферной пыли на маршруте отбора проб от Томской ГРЭС-2. — результат численного моделирования; ○, ● опорные и контрольные точки измерений

в окрестностях Томской ГРЭС-2. Восстановленные по двум опорным точкам наблюдений кривые носят подобный характер, что позволяет проводить взаимный контроль измерения этих элементов. Значительные превышения измеренных концентраций урана и тория от расчетных в точках 1,6 и 2 км для зимнего сезона 2009/10 г., а также расхождения в точке 2 км для зимних сезонов 2010/11, 2011/12 гг. скорее всего связаны с наличием вблизи дополнительных локальных источников данных элементов. Отметим, что одним из таких источников может быть частный сектор жилых домов на ул. Балтийская, Черноморская, Заречная при восточном направлении ветра. Другим источником поступления может являться золоотвал, расположенный в пойме р. Ушайки. Стоит отметить, что зимний сезон 2011/12 г. был малоснежным, т.е. происходило медленное и неполное снегоза-

легание, что могло отразиться на процессах ветрового переноса с золоотвала.

Максимумы концентраций урана и тория находятся на расстоянии около 1 км от труб ГРЭС. Учитывая также величину указанной выше оценки  $r_{\max}$  для слабо оседающей примеси, можно сделать вывод, что скорости оседания частиц, содержащих радиоактивные элементы, являются весьма значительными, что и приводит к относительно высокому загрязнению территорий, непосредственно прилегающих к площадке. Следует также отметить, что действующая на Томской ГРЭС-2 система очистки атмосферных выбросов от золы в первую очередь наиболее эффективно задерживает крупные фракции частиц. Отсюда следует вывод, в соответствии с работой [17], о существенном влиянии процессов вымывания частиц пыли из дымового факела станции в составе ледяной крупы.

## Заключение

Проведен анализ процессов длительного загрязнения снегового покрова ураном и торием в окрестностях Томской ГРЭС-2 в зимние периоды с 2009 по 2012 г. В направлении маршрута пробоотбора установлены качественные и количественные закономерности формирования полей загрязнения снегового покрова радиоактивными элементами. Несмотря на наличие постоянно действующей системы очистки поступающих в атмосферу выбросов от золы, наиболее значимые выпадения рассматриваемых примесей в зоне до 2 км от высотных труб теплоэлектростанции происходят в виде крупных фракций частиц. Это указывает на весьма существенное влияние в зимнее время процессов вымывания пылевых частиц в составе ледяной крупы, образующейся при замерзании водяного пара в дымовой струе теплоэлектростанции. При использовании стандартных методик и руководящих документов для расчета полей концентраций необходим также дополнительный учет эффектов вымывания золы ледяной крупой.

1. *Виноградова А.А., Иванова Ю.А.* Антропогенное загрязнение природных сред в районе Костомукшского заповедника (Карелия) при дальнем переносе аэрозольных примесей в атмосфере // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 6. С. 493–501.
2. *Василенко В.Н.* Мониторинг загрязнения снежного покрова / В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 185 с.
3. *Геохимия окружающей среды* / Ю.Е. Саег, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И. Ачкасов, С.Ш. Саркисян. М.: Недра, 1990. 335 с.
4. *Назаров И.М.* Использование сетевых снегосъемок для изучения загрязнения снежного покрова / И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман, О.С. Ренне // *Метеорол. и гидрол.* 1978. № 7. С. 74–78.
5. *Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами.* М.: ИМГРЭ, 1982. 111 с.
6. *Руководство по контролю загрязнения атмосферы.* РД 52.04.186 № 2932-83. М.: Госкомгидромет, 1991. 693 с.
7. *Рапута В.Ф.* Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 6. С. 506–511.
8. *Рапута В.Ф.* Численная реконструкция радиоактивного загрязнения местности от аварии на радиохимиче-

ском заводе в Томске-7 // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 8. С. 733–737.

9. *Рапута В.Ф., Таловская А.В., Коковкин В.В., Язиков Е.Г.* Анализ данных наблюдений аэрозольного загрязнения снегового покрова в окрестностях Томска и Северска // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 1. С. 74–78.
10. *Экологический мониторинг: Доклад о состоянии окружающей среды Томской области в 2011 году* / Под ред. А.М. Адама / Департамент природн. ресурсов и охраны окружающей среды Том. обл., ОГБУ «Облкомприрода». Томск: Изд-во «Графика ДТР», 2012. 166 с.
11. *Ярославец Т.В., Рапута В.Ф.* Численная модель реконструкции полей выпадений вулканического пепла // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 6. С. 521–524.
12. *Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв* / Е.Г. Язиков, А.В. Таловская, Л.В. Жорняк. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 264 с.
13. *Таловская А.В.* Геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории г. Томска // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 6. С. 519–524.
14. *Рихванов Л.П., Язиков Е.Г., Барановская Н.В., Беляева А.М., Жорняк Л.В., Таловская А.В., Денисова О.А., Суких Ю.И.* Состояние компонентов природной среды Томской области по данным эколого-геохимического мониторинга и здоровье населения // *Безопасность жизнедеятельности.* 2008. № 1. С. 29–37.
15. *Филимоненко Е.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г.* Особенности вещественного состава пылевых атмосферных выпадений в зоне воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса (на примере Томской ГРЭС-2) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 896–901.
16. *Шатилов А.Ю.* Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2001. 24 с.
17. *Беляев С.П., Бесчастнов С.П., Хомушка Г.М., Моршина Т.И., Шилина А.И.* Некоторые закономерности загрязнения природной среды продуктами сторания каменного угля на примере г. Кызыла // *Метеорол. и гидрол.* 1997. № 12. С. 54–63.
18. *Девятова А.Ю., Рапута В.Ф.* Программный комплекс «Моделирование полей пылеаэрозольных выпадений от точечного источника для оценки загрязнения окружающей среды» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610146. (Зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ 11 января 2011 г.).

*A.V. Talovskaya, V.F. Raputa, E.A. Filimonenko, E.G. Yazikov.* **Experimental and numerical studies of long-term snow cover pollution by uranium and thorium in the vicinity of thermal power plant (on the example of Tomsk hydroelectrostation-2).**

The paper presents the results of field survey, chemical-analytical and numerical analysis of data on processes of dust aerosols precipitations in the area of intensive influence Tomsk GRES-2 of emissions in winter periods from 2009 to 2012. In the model reconstruction of the field depositions monodisperse contaminants from a point source we interpret the observed data content in the snow solid residue of uranium, thorium, in the direction of the route of sampling. It is shown that the most significant deposition of contaminants occur near vicinity of tall pipes station comprising larger particle fractions.