Применение спутниковых методов исследований при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне

М.И. Василевич, В.М. Щанов, Р.С. Василевич

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН Республика Коми, Сыктывкар, 167982, Россия E-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru

В статье представлены результаты, демонстрирующие возможности использования материалов спутниковой съемки для оценки уровня загрязненности территории. Разработан метод выделения зон аэротехногенного загрязнения вокруг промышленных объектов в тундровой зоне на основе сопоставления результатов химического анализа образцов снежного покрова и спектральных характеристик поверхности, который представляет собой метод интерполяции, основанный на линейной регрессии. Выделены оптимальные условия для построения растров оценки содержания отдельных компонентов загрязнения, влияющих на спектральные характеристики снежного покрова. Оценена точность и эффективность применения данного метода при анализе воздействия промышленных предприятий в тундровой зоне. Показано, что точность оценочных растров содержания веществ в снеге сопоставима с характеристиками погрешностей методик количественного химического анализа. На основе разработанного метода оценено поступление веществ на территорию Воркутинской агломерации с зимними атмосферными осадками, установлены ареалы распространения загрязнения вокруг промышленных объектов, рассчитано содержание компонентов в снеге санитарно-защитных зон (C33) и на фоновых территориях. Расчеты показали, что значение поступления макрокомпонентов в среднем за зимний период составило 2,9 г/м², что примерно в 6 раз выше, чем на фоновых территориях.

Ключевые слова: аэротехногенное загрязнение, данные дистанционного зондирования (ДДЗ), снежный по-кров.

Введение

Снежный покров является эффективным накопителем поллютантов, которые аккумулируются и сохраняются в нем в неизменном состоянии в течение зимы, а концентрация загрязняющих веществ в снеге оказывается обычно на 2–3 порядка выше, чем в атмосферном воздухе. По химическому составу снега можно установить площадное распределение и количественные характеристики веществ, осаждающихся зимой из атмосферы, благодаря этому – выявить источники загрязнения и ареалы их влияния, получить приближенную оценку количества токсикантов, выносимых с территории городов и промышленных площадок талыми водами и мигрирующих в почвы и подземные воды (Василевич и др., 2009; Баглаева и др., 2012; Касимов, 2012).

В настоящее время проведено множество исследований, направленных на определение зон влияния источников антропогенного загрязнения окружающей среды и геохимических аномалий накопления загрязняющих веществ в снежном покрове, как путем натурных исследований, так и путем моделирования ареалов загрязнения и анализа данных дистанционного зондирования (ДДЗ) (Barcan et al., 1996; Melnikov et al., 2003; Дмитриев, 2006; Jost et al., 2007; Шамрикова, 2010).

Использование ДДЗ в практике выделения ареалов загрязнений, наблюдаемых вокруг промышленных объектов, чаще всего основано на анализе взаимосвязи процессов снеготаяния с распределением осажденных из атмосферы на снежный покров взвешенных частиц. Наиболее благоприятные условия для выявления загрязненных участков складываются весной, когда наблюдается быстрое снижение коэффициента спектральной яркости снежного покрова (Виноградов, 1984; Kokhanovsky, 2013). Динамика и пространственные особенности весеннего схода снежного покрова косвенно несут в себе информацию о загрязнении снежного покрова и почвы поллютантами. В зонах повышенного загрязнения сход снежного покрова происходит на 3–10 дней раньше, чем на чистых участках (Григорьев, 2003).

Для исследования были выбраны промышленные территории Воркутинской агломерации. Для Воркуты с развитой угледобывающей промышленностью и крупными объектами энергетики характерны самые большие объемы выбросов на северо-западе России, в которых преобладают углеводороды, твердые вещества и диоксид серы. Запылению воздуха способствуют отвалы шахт. Другие компоненты аэротехногенного загрязнения – Mn, Zn, Ni, Cd, содержание которых в 3–10 раз больше, чем на фоновых территориях (Природная..., 2005; Воркута..., 2011).

Цель данной работы заключалась в разработке и оценке действенности метода выделения зон аэротехногенного загрязнения вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне при комплексном анализе данных дистанционного зондирования и химического состава снежного покрова.

Материалы и методы

Отбор проб снега на территории Воркутинской агломераций проводили в III декаде марта 2014 г. на открытых, визуально ровных площадках. Отбор проб снежного покрова в тундровой зоне проводили вокруг шахт «Юнь-Яга», «Воркутинская» и цементного завода (ООО «Воркутацемент»), а также на удаленных фоновых участках (puc. 1). Количественный химический анализ (КХА) образцов снега проведен в лаборатории «Экоаналит» Института биологии (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257). Для построения тематических цифровых карт исследуемых территорий в качестве основы использовали топографические карты ГосГисЦентра (ГГЦ) масштаба 1:200000, предназначенные для открытого пользования (http://www.loadmap.net), переведенные в проекцию WGS 84, UTM (41N). Оцифровку карт проводили в программном пакете Arc GIS 9.3. Картографическая база данных представлена набором векторных слоев (гидрография, транспортная инфраструктура, населенные пункты, местоположение точек отбора проб). Результаты количественного химического анализа также помещены в базу данных территории. Удаленность территории исследования от места проведения КХА затрудняет их транспортировку, сохранность проб и не позволяет отобрать их большое количество, что с одной стороны осложняет достижение поставленной цели, а с другой стороны повышает ее актуальность.

Всего было отобрано 18 проб снега. КХА компонентов талой воды проводили отдельно в фильтрате талой воды (растворимые формы) и на фильтре (малорастворимые формы) поскольку на данной техногенной территории большая часть поллютантов содержится в



Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб снега на территории Воркутинской агломерации

снеге в виде взвешенных частиц, составляя более 60% от общего модуля поступления. Для разработки методики использовали валовое содержание компонентов в снеге.

Для разработки методики оценки ареалов загрязнения вокруг Воркуты использовали зимние безоблачные снимки спутников Landsat 8 OLI: 166_13 от 05.02.2014, 166_13 от 26.04.2014, 167_13 от 12.02.2014, 167_13 от 25.04.2014, 168_12 от 19.02.2014.

Оценка загрязненности снега в тундровой зоне практически не требует подготовительных этапов, поскольку нет главного мешающего фактора – растительности. На зимних снимках полностью исключено его влияние на спектральные характеристики снежного покрова, мощность которого достигает 100–120 см. Поэтому предварительно для Landsat OLI 8 использовали лишь преобразование, чтобы привести значения в каналах к диапазону от 0 до 255. Далее снимали значения каналов для каждого изображения в точках отбора проб снега и с помощью принципов многомерной линейной регрессии (программный комплекс SPSS 11.0) рассчитывали коэффициенты для уравнения связи спектральных величин и химических показателей содержания поллютантов в снеге. Далее с помощью программы Erdas Imagine 9.0 применяли модель расчета оценочного растра со значением показателя в каждом пикселе по следующей формуле:

 $y = b + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6$, где

у – значение определяемого химического показателя в каждом пикселе;

b - свободный член линейной регрессии;

а₁-а₆ - коэффициенты регрессии при переменных;

x₁-х₂ – значения в каналах снимка (2–7).

В результате получали прогнозные растры оценки содержания каждого анализированного компонента для каждого снимка. Оценку загрязнения проводили с использованием данных о массовой концентрации каждого компонента в снеге на единицу площади путем пересчета по следующей формуле:

$$P = \frac{c_m \cdot V}{S \cdot n} \cdot 10 ,$$

где P – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения снежного покрова, г/м² или мг/м²;

с_т – массовая концентрация компонента в талой воде, мг/дм³ или мкг/дм³;

V – объем талой воды всей пробы, дм³;

S – площадь внутреннего поперечного сечения трубы для отбора проб снега, см²;

n – число кернов снежного покрова, отобранных в данной точке;

10 - коэффициент для согласования размерности.

Путем пробных построений оценочных растров были определены компоненты, для которых возможно применение данной методики, поскольку их значения и содержание в талой воде наиболее взаимосвязано со спектральными характеристиками поверхности снежного покрова – водородный показатель (pH), удельная электропроводность, суммарное содержание всех макрокомпонентов (Σ MK), суммарное содержание ионов кальция и магния (Σ (Ca, Mg)), содержание гидрокарбонат-ионов (HCO₃⁻), углерода из пересчета со значений XПК (C(XПК), химическое потребление кислорода, мг O/дм³), по формуле C(XПК) = XПК·12/32 (Руководство..., 1977), общего органического углерода (C(TOC)). Среди микрокомпонентов для территории Воркутинского промузла выявлена хорошая корреляция спектральных величин с валовым содержанием ванадия, который служит маркером загрязнения территории угольной пылью, а также с алюминием, марганцем, никелем, медью, хромом, свинцом и серой.

Был проведен подбор вариантов использования разных наборов дистанционной информации, оценена обоснованность использования разных каналов снимка. Для этого оценивали ошибку при использовании наборов из шести (2–7) каналов снимка и 3 (2–4) каналов снимка. Также первых трех компонент изображения после преобразования снимка с набором 2–7 каналов с помощью операции анализа главных компонент (principal components analysis), что по своему математическому смыслу является аналогом факторного анализа. Точность оценивали путем расчета средних значений модулей разности в точках растров значений, полученных и расчетных. При построении растров использовали как все 18 точек, так и только 13 с изъятием 30% для контроля, для верификации точности растров оценок путем сравнения измеренного в поле и полученного в растре оценки значения в тех полевых точках, которые не использовали для построения растров оценок.

Установлено, что наибольшая точность построения оценочных растров достигается при использовании набора из 6 (2–7) каналов снимка, так как при использовании только трех каналов снимка, либо 1–3 компонентов рс-анализа теряется часть информации.

Для наглядности также были рассчитаны средние значения погрешности (%) в точках растров оценок, рассчитанных с использованием 2–7 каналов снимка и сравнены с погрешностями аналитических методик определения компонентов (*табл. 1*). Необходимо отметить, что аналитическая ошибка уже допускается при расчете коэффициентов линейной регрессии и построения оценочных растров.

Из таблицы видно, что при использовании большего количества точек погрешности ниже, на что указывают более высокие значения погрешности при построении растра на основе 13 точек. Для водородного показателя погрешность построения растров оценки по 18 точкам в обоих вариантах меньше, чем погрешность по методике количественного химического анализа. Достаточно близкие величины погрешности отмечены для удельной электропроводности, содержания углерода, пересчитанного с ХПК. Сложно оценить величину погрешности для суммарного содержания макрокомпонентов, поскольку слагаются содержания 10 компонентов: Ca, Mg, K, Na, HCO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{-2-} , PO_4^{-3-} , имеющих разные значения погрешности. Высокая точность оценки получена для тяжелых металлов, особенно алюминия, марганца.

Определяемый компонент	Средние з	Характеристика погрешности мето- лики определения		
Komionem	1*	компонентов, %		
рН	4	4	5	10
электропроводность	25	27	38	20
HCO ₃ -	38	42	45	10
С (ХПК)	44	34	75	30
C (TOC)	27	26	39	12
$\Sigma(Ca, Mg)$	37	41	83	8
ΣΜΚ	24	28	37	-
V	30	38	56	24
Al	26	33	39	24
Cr	26	24	45	26 (20)****
Cu	26	29	53	26 (16)
Mn	30	33	34	32 (24)
Ni	33	40	43	26 (16)
S	30	32	63	24 (18)
Pb	33	27	40	32 (20)

Таблица 1. Средние значения погрешностей в точках отбора проб снега оценочных растров, построенных на основе 6 каналов снимка Landsat OLI 8: 166 13 05.02.2014

* – средние значения погрешности в растрах, рассчитанных по всем точкам (n = 18);

** - средние значения погрешности в растрах, рассчитанных при использовании 13 точек из 18;

*** – средние значения погрешности в точках, не использованных для построения растров оценок (n = 5);

**** – в зависимости от диапазона концентрации компонента в талой воде значение погрешности меняется.

Таким образом, данная методика может быть использована как новый метод интерполяции с применением данных космических изображений. При использовании методов интерполяции для построения оценочных растров также будут присутствовать ошибки даже при большом наборе опорных точек. В прошлых исследованиях для проверки были построены растровые поверхности распределения химических компонентов в снеге фоновых территорий таежной зоны на основе 194 точек, при этом также изымали 30% (n = 58) точек для проверки точности. Отклонения расчетных значений от измеренных в среднем составило для общей минерализации 23%, для pH – 4%, что на уровне характеристик погрешности методик КХА, которые составляют соответственно 20% и 10% (Василевич, 2012).

Результаты

Для построения карта-схем распределения загрязняющих компонентов в снеге Воркутинской агломерации в 2014 г. и оценки поступления веществ на территории СЗЗ предприятий использовали снимок Landsat 8 OLI от 05.02.2014. На *рис. 2* представлены карта-схемы распределения значений водородного показателя и суммарного содержания макрокомпонентов в снеге Воркутинской агломерации.

На карта-схемы нанесены территории предположительного размещения санитарно-защитных зон (C33) 500 м от границ промышленных площадок согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, поскольку предприятия относятся ко второму классу опасности. На картах видно, что наибольшее загрязнение снега отмечается на территории города, промышленных площадках, в местах понижения рельефа, однако загрязнение распространяется и на достаточно удаленные расстояния. Значения водородного показателя напрямую отражают степень техногенного влияния. На техногенных территориях Воркутинской агломерации наблюдается высокое содержание в снеге карбонатов кальция и магния, что обусловливает подщелачивание талых вод до значений рН 10 и более.

Проведен расчет поступления выбранных компонентов на условные C33 предприятий *(табл. 2)*. На данной территории в зимнее время года преобладают ветры западного, юго-западного и южного направлений, что должно смещать шлейф загрязнения на северо-восток (Атлас..., 1997). Однако основную часть загрязнения составляет угольная пыль и

Участок	рН	æ, мкСм/ см	Σионов, г/м²	HCO ₃ -, г/м²	Σ (Ca, Mg), Γ/M^2	S, мг/м²	Al, мг/м²	Cr, _{мг/м²}	Мп, _{мг/м²}	Си, _{мг/м²}	Ni, мг/м²	Рb, мг/м²	V, мг/м²
Фон	5,2	4,4	0,5	0,30	0,05	0,05	50	0,09	0,5	0,5	02, 0	0,05	0,20
C33	7,0	10,7	2,9	0,50	0,46	0,12	100	0,22	1,0	1,0	0,46	0,12	0,44

Таблица 2. Поступление определяемых компонентов на фоновые территории и C33 Воркутинского района



Рис. 2. Карта-схемы распределения: А – значений водородного показателя; Б – суммарного содержания ионов (г/м²) в снеге Воркутинской агломерации

зола уносов, которая оседает практически рядом с промышленными площадками и населенными пунктами на данной территории. Расчеты показали, что на территории C33 предприятий среднее значение поступления макрокомпонентов составило за более чем 5 месяцев 2,9 г/м², что примерно в 6 раз выше, чем на фоновых территориях. Наибольшее превышение над фоновым значением отмечено для суммарного содержания кальция и магния – в 9 раз.

Для остальных исследованных показателей загрязнения, также отмечается превышение над фоновым уровнем.

Для всех микроэлементов кратность превышения над фоном составляла 2 и более раза. Однако эти цифры несут в себе площадное усреднение, на территории промплощадок

a

б



а

б

Рис. 3. Карта-схема распределения значений содержания ванадия (а) и никеля (б) в снеге Воркутинской агломерации

и даже городской территории поступление поллютантов превышает фоновое в отдельных местах в десятки раз. Повышенное поступление компонентов загрязнения отмечается также за пределами СЗЗ предприятий, что связано как с переносом поллютантов, так и дополнительным влиянием эмиссии с территорий населенных пунктов, вызванным эксплуатацией ТЭС-1 и ТЭС-2, работающих на угле.

Наиболее интересна с точки зрения очерчивания ареалов загрязнения карта-схема распределения ванадия в снеге (*puc. 3a*). Отмечено превышение над фоновым содержание в снеге C33 ванадия в 2 раза. Ванадий – элемент-индикатор угольной пыли и золы – основных агентов загрязнения данной территории, поступление этого компонента про-

исходит достаточно локально, поскольку частицы, в которых он находится, оседают рядом с источниками эмиссии.

Нами получены достаточно точные оценочные растры загрязнения снега Воркутинской агломерации такими токсичными элементами, как свинец и никель, имеющие погрешность расчета 33%, что лишь немного превышает аналитическую ошибку КХА (рис. 36).

Содержание ванадия значимо коррелируют с многими другими поллютантами, что можно использовать для интерполирования ареалов максимального накопления тяжелых металлов по результатам о накоплении ванадия.

Заключение

В работе показана возможность использования ДДЗ для оценки ареалов загрязнения и расчета поступления веществ на промышленные и прилегающие к промышленным территории тундровой зоны. Разработан метод оценки загрязненности снежного покрова с использованием небольшого количества опорных точек с атрибутивной информацией о КХА и космических изображений Landsat. Предложены оптимальные условия для построения оценочных растров. На основе разработанной методики были рассчитаны модули поступления веществ на территорию Воркутинской агломерации. Выделены области наибольшего загрязнения. Дана оценка точности полученных оценочных растров распределения загрязняющих компонентов в снеге для всех территорий. Данный способ оценки загрязнения территории по спектральным характеристикам снежного покрова наиболее хорошо применим для тундровой зоны, где высота снега и отсутствие мешающего влияния растительности дают наиболее точные результаты, сопоставимые с полученными аналитическим (инструментальным) путем. Разработанный метод оценки загрязнения снежного покрова может иметь практическое применение при проведении экохимического мониторинга промышленных предприятий северных территорий.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-05-31047-мол-а и УрО РАН №14-4-ИП-9.

Литература

Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с. Воркута – город на угле, город в Арктике / М.В. Гецен. Сыктывкар, 2011. 512 с. 5.

Атлас по климату и гидрологии Республики Коми, М.: Дрофа, 1997. 115 с.
 Баглаева Е.М., Сергеев А.П., Медведев А.И. Пространственная структура техногенного загрязнения снегового покрова промышленного города и его окрестностей растворимыми и нерастворимыми формами металлов // Геоэкология, 2012. № 4. С. 326–335.

^{3.} Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенок Б.М., Габов Д.Н. Органическое вещество снежного покрова в зоне влияния выбросов целлюлозно-бумажного предприятия // Водные ресурсы. 2009. № 2. С. 182–188.

^{4.} Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенок Б.М. Химический состав снежного покрова Европейского северо-востока России. Lambert Academic Publishing, 2012. 146 с.

^{6.}

Григорьев А.И. Индикация состояния окружающей среды: Омск: ОмИПП., 2003. 128 с.

Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. Корреляция динамики снеготаяния и содержания пылевых веществ в снегу вокруг г. Омска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008. Т.1. Вып.5. С.84–91.

- 9. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2012. № 4. С.14-24.
- 10. Природная среда тундры в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения) / М.В.Гецен. Сыктывкар, 2005. 246 с.
- 11. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Под/ред. А.Д.Семенова. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1977. 540 с.
- 12. Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Рязанов М.А., Казаков В.Г. Состояние снежного и почвенного покрова вблизи цементного завода // Вода: химия и экология, 2010. № 10. С. 46-51.
- 13. Barcan V., Sylina A. The appraisal of snow sampling for environmental pollution valuation // Water, Air, and Soil Pollution, 1996. V. 89. pp. 49-65.
- 14. Jost G., Weiler M., Gluns D.R., Alila Y. The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale // Journal of Hydrology, 2007. V. 347. pp. 101–115.
- 15. Kokhanovsky A. Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation // Cryosphere, 2013. № 7. pp. 1325–1331.
 16. Melnikov S. Carrol J., Goshkov A., Vlasov S., Dahle S. Snow and ice concentrations of selected persistent
- pollutants in the Ob-Yenisey River watershed // The Science of the Total Environment, 2003. V. 306. pp. 27–37.

Application of satellite methods to assess snow cover pollution around industrial enterprises in the tundra zone

M.I. Vasilevich, V.M. Shchanov, R.S. Vasilevich

Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch RAS Komi Republic, Syktyvkar 167982, Russia *E-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru*

The article presents results demonstrating the possibility to use satellite data to assess contamination of a territory. A method to identify areas of environmental pollution around industrial facilities in the tundra zone is developed. It is based on comparison of the results of chemical analysis of snow samples and spectral characteristics of the surface, which is an interpolation based on linear regression. The optimal conditions for building a raster content evaluation of individual components of pollution affecting the spectral characteristics of snow cover were selected. The accuracy and efficacy of this method in the analysis of the impact of industrial enterprises in the tundra zone were evaluated. It is shown that the accuracy of the estimated raster content of substances in the snow is comparable to the error characteristics of the methods of quantitative chemical analysis. The intake of substances on the studied territory of Vorkuta agglomeration with winter precipitation and distribution of pollution around industrial facilities were estimated. The component content in the snow of sanitary-protection zones and background areas was calculated. The calculations showed that the average content of macrocomponents for the winter period in sanitary-protection zones is 2.9 g/m2, which is approximately 6 times higher than in the background areas.

Keywords: technogenic air pollution, remote sensing data, snow cover

References

- Atlas po klimatu i gidrologii Respubliki Komi (The Atlas of climate and hydrology of the Komi Republic), 1 Moscow: Drofa, 1997, 115 p.
- Baglaeva E.M., Sergeev A.P., Medvedev A.I. Prostranstvennaya struktura tehnogonnogo zagryazneniya snegovo-2 go pokrova promyshlennogo goroda i ego okrestnostei rastvorimymi i nerastvorimymi formamy metalov (Spatial structure of technogenic pollution of snow cover of industrial city and its surroundings by soluble and insoluble
- forms of metals), *Geoekologiya*, 2012, No. 4, pp. 326–335. Vasilevich M.I., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Gabov D.N. Organicheskoe veshestvo snegnogo pokrova 3. v zone vliyaniya vybrosov cellulosno-bumagnogo predpriyatya (Organic matter of the snow cover in the zone of influence of emissions of pulp and paper enterprises), Vodnie resursy, 2009, No. 2, pp. 182–188.
- Vasilevich M.I., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Himicheskyi sostav snegnogo pokrova Evropeiskogo 4 severo-vostoka Rossii (The chemical composition of the snow cover of the European North-East of Russia the chemical composition of the snow cover of the European North-East of Russia), Lambert Academic Publishing, 2012, 146 p.
- 5. Vinogradov B.V. Aerokosmicheski monitoring ekosistem (Aerospace monitoring of ecosystems), Moscow: Nauka, 1984, 320 p.
- Vorkuta gorod na ugle v Arktike (Vorkuta the coal city in the Arctic) / Gecen M.V., Syktyvkar, 2011, 512 p.
- Grigor'ev A.I. Indikaciya sostoyaniya okrugaushei sredy (Indication of a state of environment) Omsk: OmIPP, 2003, 128 p.

- 8. Dmitriev A.V., Dmitriev V.V. Korelyaciya dinamiki snegotayaniya i soderganiya pylevyh veshestv v snegu vokrug g.Omska (Correlation of snowmelt dynamics and the content of dust substances in snow round Omsk), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, T. 1, Vol. 5, pp. 84–91.
- nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2008, T. 1, Vol. 5, pp. 84–91.
 9. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geohimiya snegnovo pokrova v Vostochnom okruge Moskvy (Geochemistry of snow cover in the East district of Moscow), Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geographiya, 2012, No. 4, pp.14–24.
- 10. Prirodnaya sreda tundry v usloviyah otkrytoi razrabotki ugly (na primere Un'yaginskogo mestorogdeniya) (Tundra environment in the conditions of open-cast mining of coal (by the example of the Yunyaginsky field)), Syktyvkar, 2005, 246 p.
- 11. Rukovodstvo po himicheskomu analizu poverhnostnyh vod sushy (Manual on chemical analysis of surface waters), St. Petersburg: Hidrometeoizdat, 1977, 540 p.
- 12. Shamrikova E.V., Vanchikova E.V., Ryazanov M.A., Kazakov V.G. Sostoyanie snegnovo i pochvennogo pokrova vblizi cementnogo zavoda (Condition of snow and soil cover near cement works), *Voda: himiya i ekologiya*, 2010, No. 10, pp. 46–51.
- No. 10, pp. 46–51.
 13. Barcan V., Sylina A. The appraisal of snow sampling for environmental pollution valuation, *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, Vol. 89, pp. 49–65.
- 14. Jost G., Weiler M., Gluns D.R., Alila Y. The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale, *Journal of Hydrology*, 2007, Vol. 347, pp. 101–115.
- Kokhanovsky A. Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation, *Cryosphere*, 2013, Vol. 7, pp. 1325–1331.
 Melnikov S., Carrol J., Goshkov A., Vlasov S., Dahle, S. Snow and ice concentrations of selected persistent
- Melnikov S., Carrol J., Goshkov A., Vlasov S., Dahle, S. Snow and ice concentrations of selected persistent pollutants in the Ob–Yenisey River watershed, *The Science of the Total Environment*, 2003, Vol. 306, pp. 27–37.