

**Koshkina Lyudmila Borisovna,**

Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; luda.koschkina@yandex.ru

**Sulimenko Lyudmila Petrovna,**

Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; gonor@list.ru

**Svetlov Anton Viktorovich,**

Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; svetlov@inep.ksc.ru

**Mingaleva Tat'yana Anatol'evna,**

Engineer of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; mingalevat@mail.ru

**Denisova Yulia Leonidovna,**

PhD (Engineer), Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; juliabajurova@mail.ru

**Krasavtceva Evgenia Andreevna,**

Senior laboratory assistant researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; vandeleur2012@yandex.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.160-179

УДК 502.51-027.21

**С. И. Мазухина**

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН  
Лаборатория экологии промышленного производства*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕШЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ**

**Аннотация**

Рассмотрены возможности применения различных методов моделирования для изучения состояния атмосферы, водных и наземных экосистем Мурманской области и прогнозирования их изменения под влиянием внутренних и внешних факторов. Приведены итоги моделирования процессов формирования химического состава поверхностных и подземных вод Хибинского горного массива; трансформации промежуточных продуктов распада нефти в морских и пресных водах; прогнозные расчеты по содержанию пыли в воздушном бассейне города Апатиты в зависимости от высоты пылящей поверхности хвостохранилища АО «Апатит» и направления и скорости воздушных потоков над ним.

**Ключевые слова:**

*термодинамическое и численное моделирование, морские и пресные воды, нефтезагрязнение, мультидисперсная пыль, хвостохранилище, Мурманская область.*

**S. I. Mazukhina**

**APPLYING MODELING FOR A SOLVING OF ECOLOGICAL PROBLEMS**

**Abstract**

There were considered possibility of applying models to study complex natural systems of the Murmansk region. Various modeling methods were applied to investigate internal and external factors influence on the change of regional geoecological systems, to study interactions mechanisms in the "water-rock-organic matter" system, to forecast

geoecological consequences of the man-made activities influence on the atmosphere, aquatic and terrestrial ecosystems in the Arctic.

**Keywords:**

*thermodynamic and quantity modeling, Sea and fresh water, oil pollution, multi-dispersed dust, tailing dump, Murmansk region.*

**Введение**

Математическое моделирование для изучения состояния атмосферы, водных и наземных экосистем Мурманской области и прогнозирования их изменения под влиянием внутренних и внешних факторов — традиционное направление деятельности ИППЭС КНЦ РАН. Исследования связаны с решением актуальных проблем современной геохимии, гидрологии и атмосферного переноса, в частности — с изучением распространения загрязняющих веществ в приземном слое. Для прогнозирования состояния воздушной и водной сред используются два метода моделирования: физико-химический (или термодинамический) и численный (метод конечных разностей и конечных элементов). Численное моделирование позволяет решать проблему влияния высоты пылящих поверхностей («пляжей» хвостохранилищ горнорудных предприятий) и скорости ветрового потока над ними на загрязнение приземного слоя атмосферы. Таким образом, основной областью применения результатов каждого из методов моделирования является природопользование и охрана природы.

В статье представлены результаты двух научно-исследовательских проектов: «Моделирование природных процессов и антропогенного воздействия на окружающую среду Субарктики» (2012–2014 гг.) и «Моделирование природных и техногенно-измененных систем в условиях Арктики» (2015–2018 гг.) под научным руководством д.т.н. В. А. Маслобоева. Ряд исследований проведено в сотрудничестве с ИХТРЭМС и ГоИ КНЦ РАН.

**Физико-химическое моделирование природных и техногенных экосистем Мурманской области**

***Моделирование процессов деградации нефти в природных водах***

Актуальность исследования процессов деградации нефтепродуктов в морских экосистемах Мурманской области обусловлена развитием проектов широкомасштабной транспортировки нефти в акваториях Баренцева и Белого морей. Нефть и нефтепродукты, поступающие в окружающую среду при добыче, переработке, транспортировке и аварийных разливах, являются источником серьезной экологической угрозы. Наиболее опасны последствия нефтезагрязнения морей бассейна Северного Ледовитого океана. Данные из ежегодников качества морских вод и отчетов различных организаций не содержат полного гидрохимического анализа вод Кольского и Кандалакшского заливов и не позволяют оценить текущую степень их загрязнения нефтепродуктами и, следовательно, спрогнозировать негативные последствия этого типа воздействия на морские системы.

Объектами исследования были:

- морские воды Кольского залива Баренцева моря на севере Мурманской области и Кандалакшского залива Белого моря на юге области;
- атмосферные осадки (дождевые и талые воды) в зоне влияния горнопромышленного комплекса;
- природные воды Хибинского горного массива, расположенного в центральной части области.

Основная задача заключалась в оценке возможности и эффективности использования метода физико-химического моделирования для изучения особенностей формирования ионного состава морских и пресных вод при воздействии органического вещества, главным образом — нефтепродуктов. Предполагалось не только оценить современное состояние вод, но и предложить способ прогнозирования их изменений. Основными инструментами были **программный комплекс «Селектор»** и **термодинамическая модель** взаимодействия природных вод с нефтепродуктами, адаптированная к условиям Мурманской области. В основу работы была положена концепция гидролитического диспропорционирования — процесса химического взаимодействия органического вещества с водой, приводящего к образованию органических соединений с различной степенью окисления углерода, в том числе — органических кислот, которые являются активными участниками многих гидрогеохимических процессов.

Отбор проб морской воды проводили в Кольском и Кандалакшском заливах в 2011–2013 гг. (рис. 1). Мониторинг воды в вершине Кандалакшского залива выполнен совместно с сотрудниками Кандалакшского заповедника.

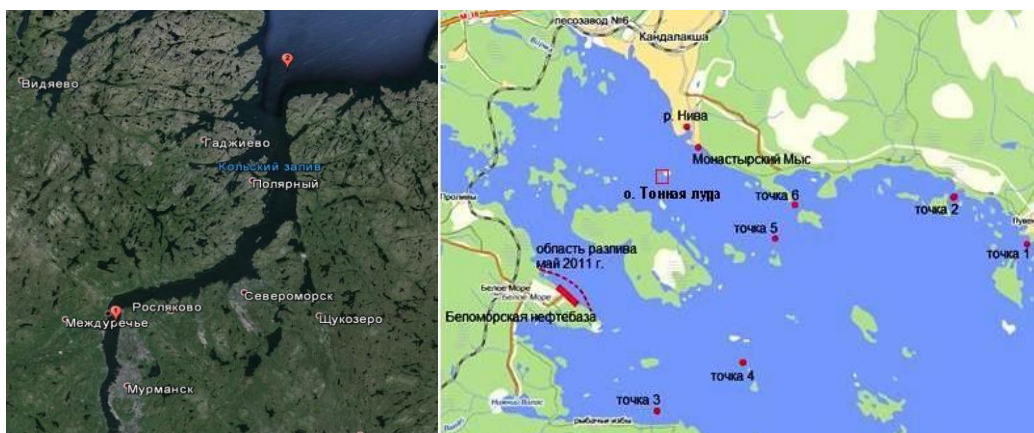


Рис. 1. Расположение точек отбора проб воды в Кольском (слева) и Кандалакшском (справа) заливах в 2011–2013 гг.

Координаты точек Кольского залива: № 1 —  $69^{\circ}03,294$  с. ш.,  $33^{\circ}05,424$  в. д.;  
№ 2 —  $69^{\circ}19,133$  с. ш.,  $34^{\circ}06,673$  в.д.; Кандалакшского залива:  
№ 1 —  $67^{\circ}07,3507$  с. ш.,  $32^{\circ}26,1794$  в. д.; № 2 —  $67^{\circ}07,3124$  с. ш.,  $32^{\circ}26,2627$  в. д.;  
№ 3 —  $67^{\circ}02,673$  с. ш.,  $32^{\circ}23,753$  в. д.; № 4 —  $67^{\circ}03,349$  с. ш.,  $32^{\circ}28,152$  в. д.;  
№ 5 —  $67^{\circ}05,907$  с. ш.,  $32^{\circ}29,779$  в. д.; № 6 —  $67^{\circ}06,429$  с. ш.,  $32^{\circ}30,539$  в. д.

В результате полного гидрохимического анализа морских вод Кольского и Кандалакшского заливов выявлено, что содержание в них Ni, Cu, Fe на несколько порядков выше в сравнении с водами Мирового океана (рис. 2).

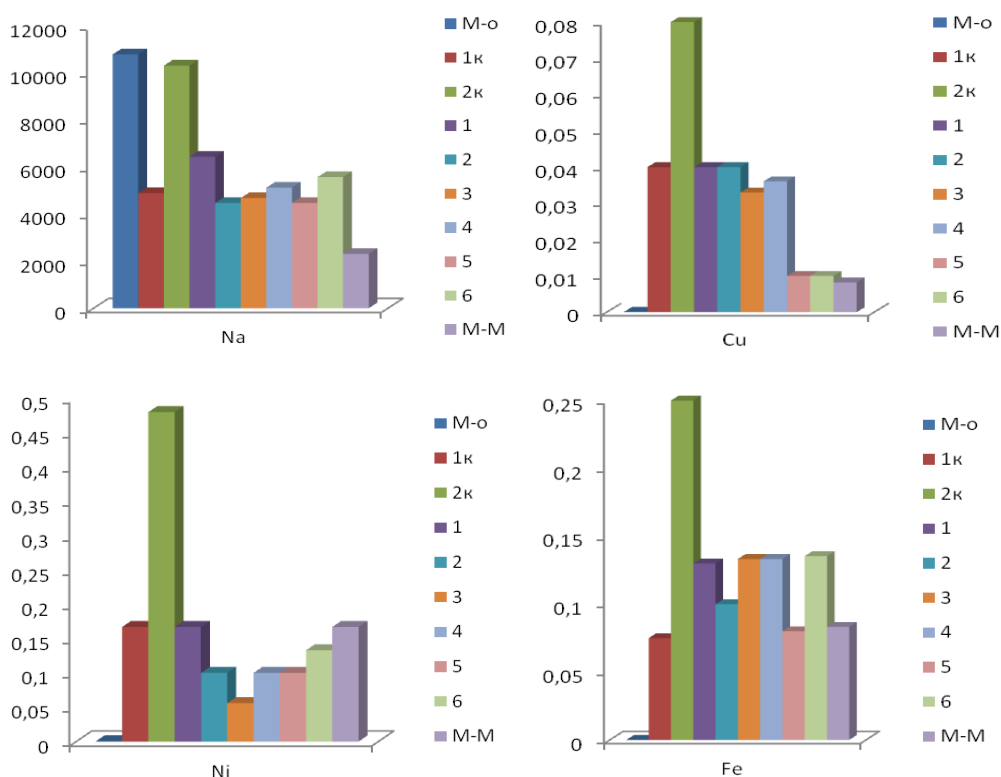


Рис. 2. Концентрации ряда элементов в морских водах (мг/л):  
 М-о — мировой океан (по: Гаррелс и Крайст, 1968; Химия морей и океанов, 1995); 1к, 2к — Кольский залив Баренцева моря; 1–6 — Кандалакшский залив Белого моря; М-М — Монастырский мыс в Белом море

*Моделирование процессов деструкции нефтепродуктов в морских водах.*  
 Одним из объектов, где могут возникать аварийные разливы нефтепродуктов, является ЗАО «Беломорская нефтебаза» в Кандалакшском заливе Белого моря. Локальная чрезвычайная ситуация в результате разлива нефтепродуктов произошла на Беломорской нефтебазе в мае 2011 года. В результате попадания нефтепродуктов в акваторию Кандалакшского залива экологический ущерб составил 2,4 млрд руб., но в тот же месяц режим чрезвычайной ситуации был отменен (Рыбчак, 2011).

Белое море — это неглубокое внутреннее море (средняя глубина 67 м, максимальная — 350 м). Его котловина отделена от Баренцева моря подводным порогом, глубиной 20–40 м, что затрудняет водообмен с этим внешним морем (Гурский, 2003) и определяет направление основных течений (рис. 3). Органическое вещество нефтяного происхождения накапливается в морях по направлению движения вод (Швец, 1970), значения Eh в придонных водах и на поверхности илов положительные (Гурский, 2003). Поскольку загрязнение вод

Белого моря продолжается многие годы, для оценки современного состояния его акватории необходимо вести мониторинг вод и илов, особенно в районе аварийных разливов, с учетом рельефа дна в связи с возможным накоплением и деструкцией органического вещества в глубоководных участках.

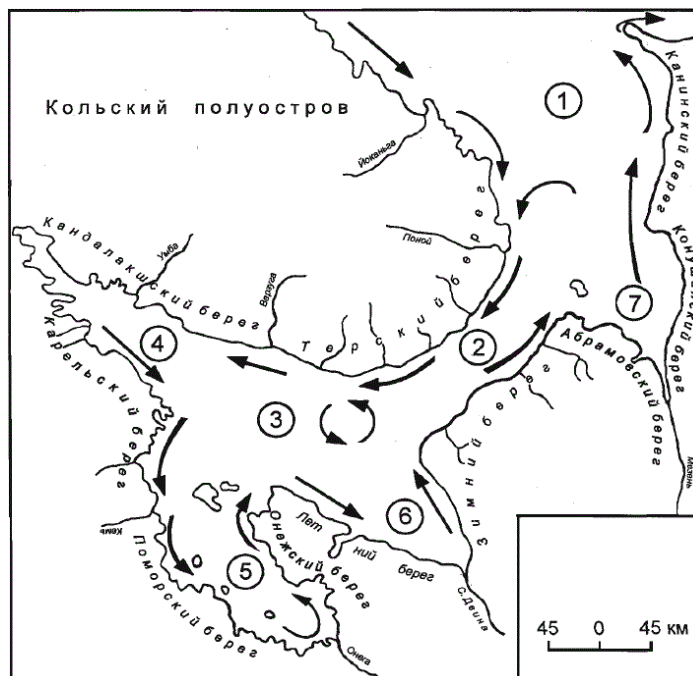


Рис. 3. Схема постоянных течений поверхностного слоя вод Белого моря (по: Мартынов, 2005): 1 — воронка; 2 — горло; 3 — бассейн. Заливы: 4 — Кандалакшский; 5 — Онежский; 6 — Двинский; 7 — Мезенский. Направление основных течений обозначено стрелками

В июне–июле 2012 года был проведен отбор проб поверхностных и придонных вод в нескольких точках залива (№№ 3–6, рис. 1), которые были выбраны в полосе прилива, а также иных сред в зоне антропогенного воздействия со стороны нефтебазы (рис. 1). Лабораторные исследования проб включали измерение pH воды потенциометрическим методом без предварительной фильтрации; определение содержания элементов методами атомно-абсорбционной (Ca, Mg, K, Na) и эмиссионной (Al, Fe, Zn, Mn, Cu, Ni) спектрометрии и фотоколориметрии (Si, общий P, фосфаты); анионного состава вод ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и Cl) — методом ионообменной хроматографии (аналитик Е. О. Киселева).

Результаты моделирования химического состава донных вод, отобранных в точке 3 (рис. 1), указывают на отсутствие кислорода ( $E_h < 0$ ) на фоне высокого содержания углекислого газа  $\text{CO}_2$  и гидрокарбонат-ионов  $\text{HCO}_3^-$  (рис. 4). Такие условия соответствуют трансформации углеводов, которые попали в район отбора проб либо во время аварийного разлива в мае 2011 года, либо в результате постоянного подтока нефтепродуктов от нефтебазы.

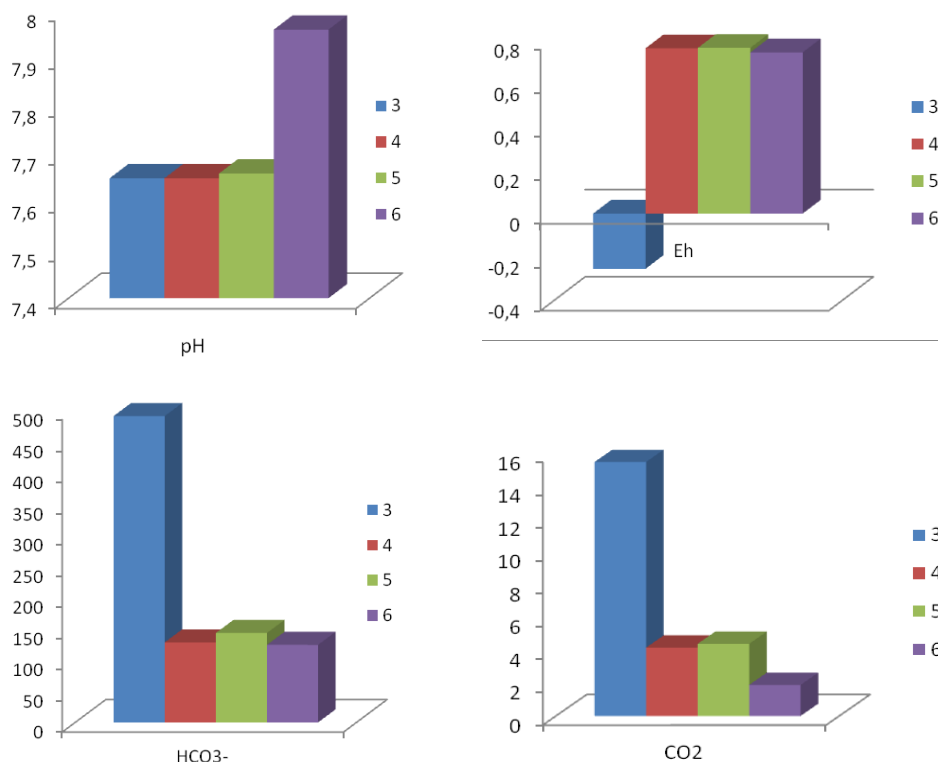


Рис. 4. Значения гидрохимических показателей в точках отбора проб воды в Кандалакшском заливе. Глубина отбора по точкам: № 3 — 15 м, № 4 — 20 м, № 5 — 14 м, № 6 — 9 м. Содержание CO<sub>2</sub> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> приведено в мг/л

Низкие (< 100 мВ) значения Eh (окислительного потенциала системы) в поверхностных слоях донных отложений соответствуют высокой органической нагрузке, критической для бентосных организмов (Иванов, 2007). Таким образом, результаты моделирования свидетельствует о явном неблагополучии экологических условий для донной фауны в окрестностях Беломорской нефтебазы, причиной чего были последствия катастрофы в виде продолжавшегося разложения углеводородов в придонных водах залива. Рекомендуется продолжать мониторинговую экспресс-оценку окислительных условий в грунте и придонных водах в районе нефтебазы.

Результаты моделирования нашли подтверждение в итогах федерального мониторинга прибрежно-шельфовой зоны Белого моря, который проводился АО «Севморгео» с 2001 по 2011 гг. (Корнеев и др., 2012). В отчете «Севморгео» в 2009 году зафиксировано отсутствие зоны окисления при отборе проб донных отложений на Кандалакшском рейде напротив порта. Поверхность донных отложений была покрыта черными илами, содержащими повышенные концентрации тяжелых металлов и нефтепродуктов.

Наши исследования показывают, что лишь использование информационных технологий дает объективную картину чрезвычайной ситуации. Физико-химическое моделирование позволяет не только оценить уже

сложившуюся ситуацию, но и воссоздать ее возникновение и развитие и спрогнозировать будущие сценарии.

*Моделирование взаимодействия в системе «нефть-вода».* Цель исследования состояла в определении различий во взаимодействии системы «нефть-вода» для морских и пресных вод с использованием метода физико-химического моделирования.

Объектами исследования были пресные воды реки Нива (Кандалакшский район Мурманской области), воды горного озера Большой Вудъявр, насыщенные газами атмосферные (дождевые) воды, морские воды Кольского (рис. 1, точка № 2) и Кандалакшского заливов (рис. 1, Монастырский мыс). Отбор проб вод в Кандалакшском заливе проведен во время экспедиции в сентябре 2011 года. Воды Кольского залива апробированы в октябре 2011 года. Аналитические данные по химическому составу воды р. Нива заимствованы из справочника Центра мониторинга окружающей среды Мурманской области за 2007 год (Справка ..., 2008). Химический состав вод оз. Большой Вудъявр восстановлен после экологической катастрофы 1930-х гг. с помощью физико-химического моделирования (Мазухина 2012, Калининков и др., 2013). Состав чистых дождевых вод ( $pH = 5,6$ ) смоделирован как взаимодействие 1 кг атмосферы и 1000 кг воды. Состав нефти рассчитан в масс. %: С — 86, Н — 13 (Эрих, 1969).

На основании аналитических данных были созданы термодинамические модели пресных и морских вод (Мазухина, 2012) и изучены различные сценарии взаимодействия морской и пресной воды (1000 кг) с нефтью (100 г), при которых количество нефти учитывалось в зависимости от степени взаимодействия  $10^{-\xi}$ . В моделях значение  $\xi$  варьировало от 3 до  $-2$ , что соответствовало изменению содержания нефти в системе «вода-нефть» от 0,1 мг/л до 10 г/л. Все расчеты проведены для температуры  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и атмосферного давления  $P = 1$  бар.

Были сделаны следующие допущения: 1) взаимодействие воды (морской/пресной) с нефтью происходит в закрытых, относительно атмосферы, условиях (в природных системах это может соответствовать постоянному подтоку нефти в водную среду); 2) конечными продуктами разложения нефти являются  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ; 3) расчеты выполняются с азотфиксацией (с образованием в восстановительных условиях  $\text{NH}_3$  и  $\text{NH}_4^+$ ) и без нее.

В результате моделирования во взаимодействии морских и пресных вод в системе «вода-нефть» выявлены как сходства, так и различия для основных гидрогеохимических показателей: изменение значений  $pH$ ; возникновение окислительно-восстановительного барьера; образование органокомплексов и состав новообразованных фаз; формирование сероводородной азотно-углекислой метановой атмосферы в газовой фазе в морских водах.

Характер изменения показателей  $pH$  и  $Eh$  в системе «вода-нефть» в зависимости от степени взаимодействия с нефтью иллюстрирует возникновение окислительно-восстановительного барьера в морских ( $0,1 < \xi < 0,08$ ) и пресных водах ( $\xi = 0,07$ ) (рис. 5). В пресных водах значения  $pH$  смещены в более кислую область, в морских водах этого не происходит из-за карбонатов, которые образуются не при любых значениях  $\xi$ , а лишь в диапазонах  $3 < \xi < 2$  и  $-0,5 < \xi < -2$  (точка № 2). В газовой фазе формируется сероводородная азотно-углекислая метановая атмосфера. Образование иона  $\text{NH}_4^+$  не оказывает существенного влияния на изменение значений  $pH$  морских вод, в пресных же водах это приводит к формированию щелочной среды.

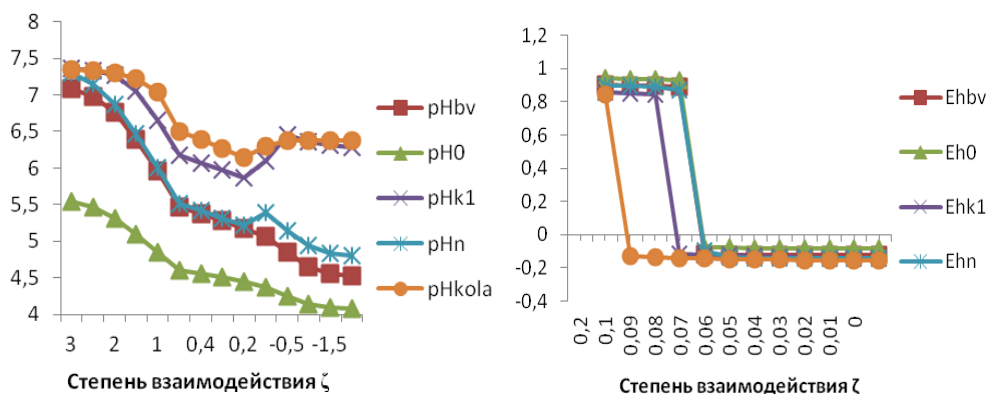


Рис. 5. Изменение показателей pH и Eh в системе «вода-нефть» в зависимости от степени взаимодействия с нефтью.

Источники воды: 0 — дождевая вода; bv — оз. Большой Вудъявр;

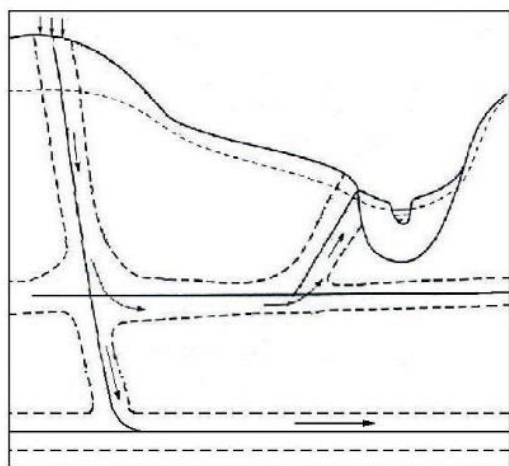
n — р. Нива; k1 — Кандалакшский залив (точка № 1),

kola — Кольский залив (точка № 2)

**Определение физико-химических факторов некондиционности природных вод Хибинского горного массива**

Проблема использования вод Хибинского массива для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения связана с их некондиционностью по уровню pH и содержанию фтора и алюминия.

В вертикальном разрезе массива различают три гидрогеологические подзоны: верхнюю или зону аэрации, среднюю и нижнюю (рис. 6).



Обозначения:




-  уровень подземных вод;
-  направление движения подземных вод;
-  область питания подземных вод.

Рис. 6. Схема движения подземных вод в Хибинском горном массиве (Калинников и др., 2014)



Процессы формирования поверхностных и подземных вод в пределах Хибинского массива были проанализированы с использованием 4-резервуарной физико-химической модели системы «вода – порода – атмосфера – углерод» (Мазухина, Сандимиров, 2005; Мазухина и др., 2010; Mazukhina et al., 2012) (рис. 7). В модели учитывали кларковые концентрации ряда элементов — S, Cl, F, C (Кухаренко и др., 1968) с целью определения их влияния на химический состав водных растворов.

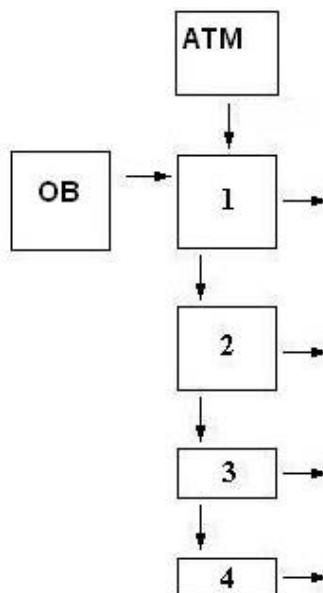


Рис. 7. Схема 4-резервуарной имитационной модели взаимодействия «вода-порода-атмосфера-органическое вещество»: ATM — атмосфера; OB — органическое вещество

Показано, что формирование химического состава вод третьей подзоны происходит в результате взаимодействия поверхностных (речных) вод с породой. Время их взаимодействия и температура являются основными факторами, влияющими на окислительно-восстановительные условия, которые способствуют содообразованию и связанному с этим процессом резкому скачку концентраций гидрокарбонат-ионов  $\text{HCO}_3^-$ , F и Al (Калинников и др., 2014).

Подземные воды, распространенные в коренных породах и четвертичных отложениях, образуют взаимосвязанные водоносные горизонты, поэтому усиленная эксплуатация водоносных скважин, как правило, приводит к «подсосу» некондиционных вод из глубин. Во избежание подобного эффекта необходимо предусмотреть аэрацию воды — закачивание кислородсодержащих вод в скважины, предназначенные для питьевого водоснабжения, или использовать иные способы водоподготовки с учетом установленного факта (табл. 1, резервуар № 4).

Разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования химического состава природных вод Арктики.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса взаимодействия поверхностных вод  
(река Кунийок) с породами Хибинского горного массива

Параметры	Поверхностные воды	Резервуары			
		1	2	3	4
T, °C	–	5	5	5	10
P, бар	–	1	2	2	3
pH	7,26	7,43	7,40	7,3409	9,12204
Eh, В	–	0,810	0,811	0,805	-0,33369
Элементы (ионы), мг/л					
Al	–	7,56E-06	7,33E-06	6,94E-06	2,04E-04
C	–	3,53	4,15	6,70	10,8
Ca <sup>+2</sup>	0,25	3,57E-01	5,14E-01	1,17	2,07
Mg <sup>+2</sup>	0,4	4,36E-01	4,98E-01	7,51E-01	1,03E-01
K <sup>+</sup>	1,95	1,95	1,94	1,93	1,04
Na <sup>+</sup>	5,22	5,95	7,12	11,9	19,9
Fe	–	7,00E-09	7,16E-09	7,50E-09	2,01E-04
Sr <sup>+2</sup>	0,016	2,66E-02	4,37E-02	1,14E-01	4,44E-02
CO <sub>2</sub> <sup>0</sup>	0,88	1,36	1,71	3,12	8,03E-02
O <sub>2</sub> <sup>0</sup>	–	10,5	8,82	1,96	–
CH <sub>4</sub>	–	–	–	–	2,85E-05
HS-	–	–	–	–	1,69E-03
NH <sub>3</sub>	–	–	–	–	4,59E-01
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	17,67	16,0	18,7	29,6	52,3
F <sup>-</sup>	–	2,25E-02	5,71E-02	2,01E-01	4,38E-01
Cl <sup>-</sup>	0,78	9,64E-01	1,26	2,48	4,49
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	2,88	3,18	3,69	5,76	4,18E-03
SiO <sub>2</sub> <sup>0</sup>	–	3,93	3,93	3,93	5,35
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	9,18	–	–	–	–
P	–	3,78E-03	1,68E-03	3,45E-04	8,59E-07
Mn	–	–	–	–	7,35E-02
Твердые фазы, мг/л					
SiO <sub>2</sub>	–	7,66E-02	1,12E-01	3,51E-01	4,55E-01
FeS <sub>2</sub>	–	–	–	–	4,41E-02
FeO(OH)	–	5,43E-03	1,13E-02	3,99E-02	–
FeCO <sub>3</sub>	–	–	–	–	3,47E-08
CaCO <sub>3</sub>	–	–	–	–	1,97E-03
MnCO <sub>3</sub>	–	–	–	–	2,24E-03
SrCO <sub>3</sub>	–	–	–	–	1,93E-03
Apt	–	9,48E-05	2,84E-04	1,01E-03	1,86E-03
Msc	–	1,39E-02	2,89E-02	1,02E-01	1,80E-01
MnO <sub>2</sub>	–	2,53E-04	5,28E-04	1,86E-03	–
Смектиты*	–	–	–	–	1,36E-02
Селадониты*	–	–	–	–	3,02E-02

Примечание. \*Смектиты — Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>, селадониты — KFeAlSi<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.

### Определение состояния подземных вод Хибинского массива

В результате изучения взаимодействия в системе «вода-порода-атмосфера» с помощью физико-химического моделирования и определения изотопного состава воды (анализ содержания тяжелых изотопов водорода δ<sup>2</sup>H и кислорода δ<sup>18</sup>O, ‰) установлено происхождение подземных вод Хибинского массива, используемых для питья (Гудков и др., 2015). Исследована вода из родника

«Прихивинский» (9-й километр автодороги Апатиты-Кировск); вода, поступающая из скважин на 23-м километре автодороги (источник № 1) и возле Хибинского женского монастыря (мкр. 23 км г. Кировска) (источник № 2).

Высокие концентрации Na, Ca, K и  $\text{HCO}_3^-$  в воде обоих источников могут быть следствием как их значительной глубины, так и влияния антропогенных вод. Сходство концентраций основных катионов и анионов в источниках с такими показателями вод реки Юкспоррйок и озера Большой Вудъявр, а также высокие концентрации аниона  $\text{NO}_3^-$ , свидетельствуют о влиянии антропогенно-измененных поверхностных вод на химический состав воды в исследованных скважинах (рис. 8). Сезонные изменения содержания изотопов водорода и кислорода в скважинах не отличаются от их сезонной динамики в поверхностных водах Хибин.

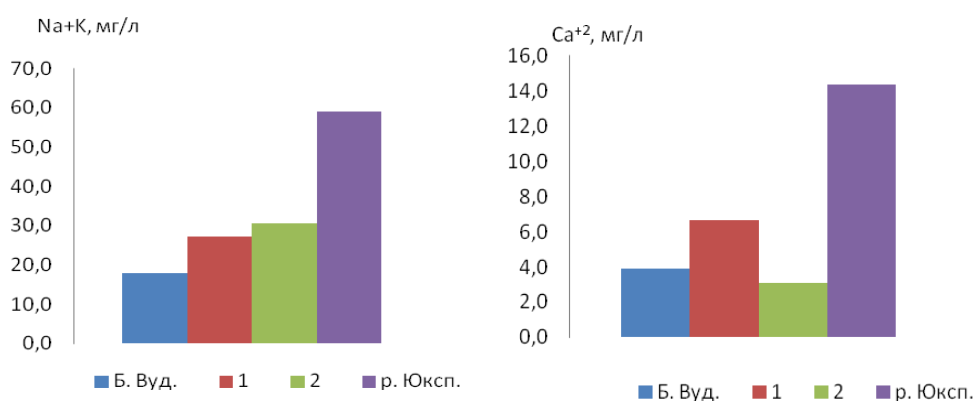


Рис. 8. Результаты анализа химического состава подземных вод источников № 1 и № 2 (2014 г.) и поверхностных вод озера Большой Вудъявр и реки Юкспоррйок (среднее значение за 1993–1997 гг.).

Химический состав и изотопный анализ воды в роднике «Прихивинский» указывают на комплексный характер питания за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из трещинно-жильных зон разломов горных пород.

#### Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ

В 80–90 гг. сотрудники Кольского научного центра РАН под руководством А. А. Бакланова выполняли работы по численному моделированию распространения пыли на ближайшем к городу Апатиты хранилище «хвостов» — отходов обогащения руд апатито-нефелиновой фабрики АНОФ-2 (Бакланов, 1988; Baklanov, Rigina, 1998). Расчеты выполнялись по авторским моделям и компьютерным программам, в которых уравнения, описывающие процессы аэротермогазодинамики, решались конечно-разностными методами на неравномерных прямоугольных сетках. Представляется, что именно на основе математического моделирования можно решать проблему влияния высоты и геометрической формы хвостохранилища на изменение воздушных потоков над пылящими поверхностями и прогнозировать содержание пыли в воздушном бассейне при неблагоприятных метеорологических условиях.

В 2012–2015 гг. в рамках задачи «Численное моделирование переноса загрязнений в приземном слое атмосферы с пылящих поверхностей хвостохранилищ (на примере хранилища отходов обогащения АНОФ-2)» проводилась оценка влияния высоты пляжа хвостохранилища на потенциальное загрязнение воздушной среды при переносе мультidisперсной пыли, сдуваемой сильным ветром с поверхности пляжа. Основными исполнителями этого проекта были д.ф.-м.н., профессор А. А. Бакланов и к.т.н. П. В. Амосов.

Расчет аэродинамических параметров обтекания и конвективно-диффузионного переноса мультidisперсной пыли при вариации высоты пылящей поверхности на основе двухмерной CFD-модели в программе COMSOL позволил спрогнозировать существенное (от 50 до 150 %) возрастание загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по потоку с ростом высоты пляжа хвостохранилища АНОФ-2 (Амосов, Бакланов, 2012а, 2012б; Amosov, Baklanov, 2012). Аналогичную объективную оценку потенциального воздействия загрязнения необходимо провести для принятия решения по наращиванию высоты дамбы хвостохранилища от отметки 180 м до 200 м. В качестве инструмента исследования предложено использовать (после определенной адаптации) авторские программы, ранее разработанные в ИППЭС КНЦ РАН, а также компьютерный код COMSOL.

Более сложными и объемными задачами были:

- подготовка и обоснование базовых параметров трехмерной цифровой модели района «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты», необходимых для построения компьютерной модели в программной среде COMSOL;

- создание и тестирование трехмерных цифровых компьютерных моделей, позволяющих для района «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты» выполнять прогнозные оценки влияния высоты пылящей поверхности на уровень загрязнения атмосферы и ее приземного слоя в г. Апатиты;

- адаптация компьютерных программ ИППЭС КНЦ РАН, разработанных для расчета аэротермодинамических параметров и переноса загрязнений (радионуклидов) под проблему распространения радиоактивных веществ в случае аварийного выброса на Кольской АЭС.

Создание цифровых трехмерных компьютерных моделей района «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты», позволяющих выполнять прогнозную оценку влияния высоты пылящей поверхности хвостохранилища на уровень загрязнения атмосферы и земной поверхности в г. Апатиты, стало главным итогом НИР (Маслобоев и др., 2013, 2014). На базе этих моделей выполнены все последующие численные эксперименты в объемной постановке.

Отдельной задачей было численное моделирование турбулентного переноса и пространственного распределения разноразмерной мультidisперсной пыли. Было спрогнозировано, что при линейном увеличении интенсивности пыления на 30 % в районе г. Апатиты на 10–15 % возрастет концентрация пылевых частиц крупностью до 60 мкм и от 60 до 100 мкм. Анализ поперечного переноса пыли выявил, что наиболее подвержен загрязнению приземный слой воздуха в районе «Старые Апатиты» (Амосов, 2014; Amosov et al., 2014). Расчет количества пылевых частиц в единице объема воздуха показал, что, несмотря на низкие количественные показатели массовой концентрации мелкодисперсной пыли, именно этот размерный класс представляет наибольшую угрозу для

здоровья человека. Оценка эффективности мероприятий, проводимых природоохранной службой АО «Апатит» по снижению интенсивности пыления пляжей хвостохранилища, выполненная на основании расчетов продольного распределения пылевых выбросов в районе г. Апатиты, свидетельствует: концентрации пыли снижаются пропорционально увеличению эффективности защитных мероприятий.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на заседаниях Координационного совета по промышленной и экологической безопасности МЧС Мурманской области, на общественных слушаниях по проблеме реконструкции хвостохранилища АНОФ-2 до отметки 200 м (г. Апатиты, 18 ноября 2014 г.), на совместных совещаниях с представителями АО «Апатит», на российских и международных научных конференциях. В 2013–2014 гг. выполнялся хозяйственный договор по проблеме оценки влияния увеличения проектной высоты пляжа хвостохранилища АНОФ-2 на загрязнение приземного слоя атмосферы в районе г. Апатиты.

В рамках НИР 2015–2017 гг. решалась задача «Исследование влияния скорости ветрового потока на загрязнения приземного слоя атмосферы при фиксированной высоте пляжа хвостохранилища (на примере хвостохранилища АНОФ-2)» (основные исполнители д.ф.-м.н., профессор А. А. Бакланов и к.т.н. П. В. Амосов).

Итогом исследований 2015 года стала разработка базы методов численного моделирования по оценке интенсивности пыления хвостохранилища АНОФ-2 при изменении референтной скорости ветрового потока и высоты пылящей поверхности. Определены подходы к оценке горизонтального и вертикального потоков массы пыли, наиболее приемлемые для решения практической задачи о влиянии скорости ветрового потока над хвостохранилищем на загрязнение атмосферы. Предложен переход к определению динамической скорости переноса пыли и скорости на высоте +10 (+9) м над пылящей поверхностью, необходимых для выполнения прогнозных расчетов горизонтального и вертикального потоков пылевой массы. Предложение апробировано на численной модели аэродинамики атмосферы в районе «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты» (Амосов, Бакланов, 2015а,б; Amosov, Baklanov, 2015) (рис. 9).

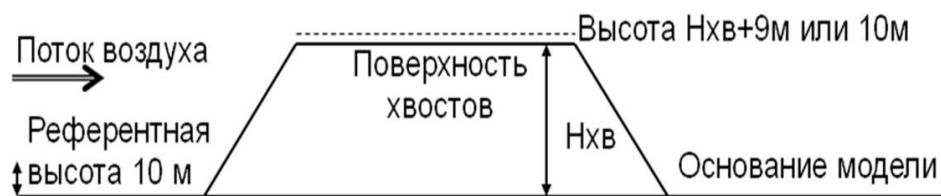


Рис. 9. Расчетная схема модели аэродинамики атмосферы в районе «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты»

Сравнительный анализ расчетных кривых вертикального потока пыли (схемы DEAD и GOCART, зависимости О. Е. Семенова и D. L. Westphal) на примере разработанной модели аэродинамики при максимальной проектной высоте хвостохранилища и вариации скорости ветрового потока в широком

диапазоне (5–23 м/с) оказал, что наиболее приемлемыми для последующих исследований загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по ветровому потоку можно считать схему DEAD (Marticorena, Bergametti, 1995) и зависимость D. L. Westphal (Westphal et al., 1988). Оба способа базируются на функциональной зависимости потока массы пыли от динамической скорости ветра на высоте пыления в 3-й и 4-й степенях соответственно (Маслобоев и др., 2016а-г).

Для численного моделирования процессов переноса пыли в трехмерной постановке необходимы компьютерные модели, позволяющие выполнять расчет аэродинамических параметров — поля скорости, коэффициентов турбулентной диффузии и др. За основу была принята трехмерная компьютерная модель площадки «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты» при максимальной проектной высоте пылящей поверхности 200 м (Амосов и др., 2014; Amosov et al., 2014). В 2016 году выполнены модернизация и корректировка этой модели с проверкой на тестовых расчетах. Модернизация была обусловлена новой возможностью задавать сложные граничные условия (например, в форме функций пространственных переменных) и анализировать расчетные данные посредством встроенных в COMSOL функций, не привлекая дополнительные программные продукты (Grapher, Surfer, Excel и др.), что существенно уменьшило время на обработку результатов численных экспериментов. Определенную корректировку аэродинамическая модель претерпела в части выбора демпфирующих параметров в схемах аппроксимации конвективных слагаемых, что обеспечило устойчивость расчетов в широком диапазоне скоростей, задаваемых на границе модели.

Можно выделить два основных этапа модернизации и корректировки: 1 — использование на входной границе модели логарифмического профиля скорости, учитывающего шероховатость подстилающей поверхности; 2 — подбор решателей и демпфирующих коэффициентов с целью снижения искусственной вязкости для уравнения сохранения импульса и уравнений  $(k - \varepsilon)$ -модели, обеспечивающих устойчивость счета на всем диапазоне скоростей ветрового потока на высоте +10 м  $U_{10}$  от основания модели. На базе модернизированных моделей выполнены расчеты аэродинамических параметров в диапазоне скорости ветра  $U_{10}$  от 5 до 23 м/с. Результаты численных экспериментов прошли качественный и количественный анализ. Отмечена физичность аэродинамических параметров по всей области моделирования.

В соответствии с предложенным и апробированным подходом (Маслобоев и др., 2016а-г) выполнено осреднение горизонтальной скорости в центральном сечении модели и переход к динамической скорости на высоте пыления, необходимой для оценки вертикального потока массы. Результаты приведены в таблице 2.

Аналогичная процедура осреднения и перехода через число Прандтля-Шмидта и плотность воздуха проведена для коэффициента динамической турбулентной вязкости на высоте +10 м над пылящей поверхностью (в центральном сечении модели) с целью оценки коэффициентов турбулентной диффузии.

Дополнительно, воспользовавшись встроенной опцией интегрирования по областям моделирования, пересчитаны осредненные по объему модели коэффициенты динамической турбулентной вязкости и коэффициенты

турбулентной диффузии. Результаты обоих переходов, как на высоте +10 м над пылящей поверхностью, так и по объему моделирования, также представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты осреднения горизонтальной скорости и перехода к динамической скорости переноса пылевой массы на высоте +10 м над поверхностью пыления, полученные с помощью модели аэродинамических параметров

Скорость ветра $U_{10}$ , м/с	Осредненная скорость $u_{10}$ , м/с	Динамическая скорость $u_*$ , м/с	Осредненные коэффициенты диффузии $\Gamma_t$ , м <sup>2</sup> /с	
			на высоте +10 м	по объему
5	6,439	0,4983	35,7	75,5
8	10,305	0,7974	57,1	121,5
11	14,172	1,0967	78,5	166,0
14	18,040	1,3960	99,9	211,6
17	21,908	1,6953	121,3	257,2
20	25,776	1,9946	142,8	302,7
23	29,791	2,3053	156,7	336,4

Выполнены обработка и анализ графической информации гранулометрического состава отвалных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2, (Стриженок, 2015). Получены количественные показатели по доле и «весу» интервала каждого промоделированного размерного класса пылевых частиц, необходимые для выполнения численных экспериментов по турбулентному переносу мультимодальной примеси (табл. 3).

Таблица 3

Показатели пыления частиц разных размерных классов

Диаметр, мкм	0–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70
Доля, % вес.	0,811	3,176	5,41	7,40	7,99	7,2	6,15
«Вес» интервала	0,022	0,083	0,142	0,194	0,209	0,189	0,161

В течение 2017 года по отработанному ранее алгоритму для каждого размерного диапазона пыли была рассчитана интенсивность пыления в соответствии с рассматриваемыми скоростями ветра для схемы DEAD и зависимости Westphal. Расчетные интенсивности пыления, выполненные для схемы DEAD, при референтной скорости ветра 5 м/с для самой мелкой пыли (срединный диаметр 5 мкм) оказались нулевыми. Этот факт объясняется тем, что величина пороговой скорости для столь мелкой пыли выше значения динамической скорости. Для значений интенсивности пыления, предложенных D. L. Westphal с соавт. (1988), выполнено численное моделирование по турбулентному переносу мультимодальной пыли для семи значений референтной скорости ветра  $U_{10}$  и двух значений осредненных коэффициентов диффузии (см. табл. 2).

В качестве источника пыления задавали общую площадь пляжа хвостохранилища, но при анализе результатов (в терминах концентрации пыли) в расчеты вводили корректирующий коэффициент, учитывающий только площадь пыления. Согласно отчету ЗАО «Механобр Инжиниринг», подготовленному к проекту реконструкции хвостохранилища до предельной высотной отметки 200 м, по результатам натурных наблюдений в 2006–2008 гг. площадь пыления хвостохранилища составляла от 8,2 до 10,9 га. В условиях существующей неопределенности в задании конкретных участков пыления на поверхности пляжа, применение корректирующего коэффициента вполне обосновано, т.к. процент пылящей поверхности логично задавать от всей площади пляжа хвостохранилища.

Анализ результатов расчетов показал слабое влияние выбранных значений коэффициента турбулентной диффузии на величину концентрации пыли. В нашем случае значения осредненных коэффициентов диффузии на высоте +10 м пылящей поверхности и по объему области моделирования отличались более чем в два раза, а снижение уровня концентрации пыли составило менее 1%.

Также были проанализированы поинтервальные и суммарные значения концентрации пыли в точке модели, которая соответствует центру г. Апатиты на высоте +2 м от поверхности. На этом шаге с учетом известных значений отношений интенсивности пыления для схемы DEAD и зависимости Westphal получены соответствующие значения концентрации пыли для схемы DEAD, и суммарной концентрации пыли в обсуждаемой точке (+2 м центра г. Апатиты) для указанных подходов описания процесса пыления в зависимости от референтной скорости ветра  $U_{10}$  на высоте +10 м от основания модели (рис. 10).

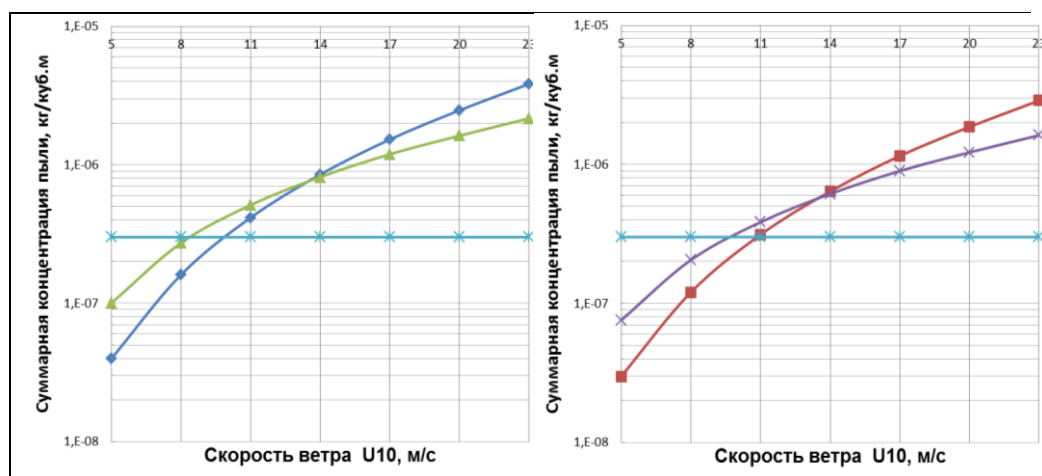


Рис. 10. Расчетные значения суммарной концентрации пыли в зависимости от скорости ветрового потока на референтной высоте для площади пылящей поверхности 10,9 га (слева) и 8,2 га (справа)

На каждом графике приведена кривая, соответствующая значению ПДК по пыли, согласно действующим гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» (Гигиенические ..., 2003). В частности,



для неорганической пыли, содержащей двуокись кремния в количестве 20–70%, максимальная разовая концентрация составляет 0,3 мг/м<sup>3</sup> или 3·10<sup>-7</sup> кг/м<sup>3</sup>.

Анализ представленных кривых свидетельствует о достаточной объективности прогнозных оценок. Очевидно, что увеличение площади пыления будет приводить к росту загрязнения атмосферы, что и показано на графиках. При скоростях ветра менее 8 м/с превышение порогового уровня загрязнения не прогнозируется, однако рост скорости сверх этого значения будет приводить к увеличению концентрации пыли и постепенному превышению значения ПДК; при штормовых ветрах это превышение будет значительным. Согласно отчету ЗАО «Механобр Инжиниринг», значения скорости ветра, превышающие 8 м/с, редки (вероятность превышения менее 5 %), но возможны. Следовательно, мероприятия по снижению площади пыления, проводимые экологическими службами АО «Апатит» на хвостохранилище АНОФ-2, необходимы. Исходя из выполненных оценок, можно прогнозировать, что снижение площади пыления на пляже хвостохранилища до 1 га обеспечит нормативную чистоту атмосферы г. Апатиты даже при штормовом северо-западном ветре, достигающем 20–23 м/с.

Для района Старых Апатитов требуется более точная модель рельефа местности. Однако, даже достаточно грубая в этом плане имеющаяся модель, учитывающая предгорья Хибин и наиболее крупные возвышенности (г. Щучья, Воробьиная), дает качественно верную картину распределения концентрации пыли: именно Старые Апатиты подвергаются максимальному загрязнению со стороны хвостохранилища при сильном северо-западном ветре, что неоднократно подтверждалось санитарными службами Мурманской области.

В заключение отметим, что исследования по проблеме численного моделирования процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 были отмечены в докладе Генеральной Ассамблеи ООН в 2016 году. В частности, в отчете «Global assessment of sand and dust storms» пыление от техногенных песчаных поверхностей (хвостохранилищ и пр.) названо одной из актуальных современных проблем атмосферного загрязнения населенных пунктов.

*Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания ИППЭС КНЦ РАН, тема «Моделирование природных и техногенно-измененных экосистем в условиях Арктики», № гос. рег.: 114110570119.*

## Литература

*Амосов П. В., Бакланов А. А.* Использование компьютерных моделей для исследования процессов пыления хвостохранилища // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Ч. 2. Апатиты: КНЦ РАН. 2012а. С. 7–11.

*Амосов П. В., Бакланов А. А.* Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-25: Сб. трудов XXV Междунар. науч. конф. В 10 т. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, Харьков: Национ. техн. ун-т «ХПИ». 2012б. Т. 2. С. 140–143.

*Амосов П. В., Бакланов А. А.* К вопросу оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: Сб. трудов XXVIII междунар. науч. конф. В 12 т. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т. 2015а. Т. 1. С. 3–5.

Амосов П. В., Бакланов А. А. Оценка вертикального потока массы пыли на хвостохранилище на базе схемы DEAD // Проблемы недропользования. 2015б. № 3. С. 80–85.

Амосов П., Бакланов А., Ригина О. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ. LAP LAMBERT Academic Publishing (Германия). 2014. 109 с.

Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: КФАН СССР. 1988. 200 с.

Гаррелс Р. М., Крайст И. П. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир. 1968. 368 с.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. М., Минздрав России. 2003. Электронный ресурс: ohranatruda.ru/ot\_biblio/normativ/data\_normativ/42/42030. Дата обращения: 12.11.2016.

Гудков А. В., Мазухина С. И., Иванов С. В. Геохимическая оценка подземных вод Хибинского массива // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды IV Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: ИВП РАН. 2015. С. 360–362.

Гурский Ю. Н. Геохимия литогидросферы внутренних морей. Т. 1. Методы изучения и процессы формирования химического состава иловых вод в отложениях Черного, Азовского, Каспийского, Белого, Балтийского морей. М.: ГЕОС. 2003. 332 с.

Иванов М. В. Оптимальные методы оценки органической нагрузки от марикультуры в условиях Белого моря // Экологические исследования беломорских организмов. Материалы 2-й международной конференции. СПб.: ЗИН РАН. 2007. С. 46–47.

Калинников В. Т., Мазухина С. И., Маслобоев В. А., Чудненко К. В., Максимова В. В. Особенности взаимодействия «нефть-вода» в морских и пресных водах // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 449. № 5. С. 535–538.

Калинников В. Т., Мазухина С. И., Маслобоев В. А., Чудненко К. В., Максимова В. В. Физико-химические факторы некондиционности химического состава природных вод Хибинского массива // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458. №5. С. 551–554.

Корнеев О. Ю., Рыбалко А. Е. Федорова Н. К. Осуществление Государственного мониторинга состояния геологической среды прибрежно-шельфовой зоны Баренцева, Белого и Балтийского морей / Окончательный отчет по Государственному контракту. Фонды Севморгео. 2012. С. 53–63.

Кухаренко А. А., Ильинский Г. А., Иванова Т. Н., Галахов А. В., Козырева Л. В., Гельман Е. М., Борнеман-Старынкевич И. Д., Столярова И. Н., Скрижинская В. И., Рыжова Р. И., Мелентьев Б. Н. Кларки Хибинского щелочного массива // Записки Российского минералогического общества. 1968. Ч. 97. Вып. 2. С.133–149.

Мазухина С. И. Формирование поверхностных и подземных вод Хибинского горного массива. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. 173 с.

Мазухина С. И., Маслобоев В. А., Чудненко К. В., Бычинский В. А., Светлов А. В. Условия формирования природных поверхностных и подземных вод Кольского Севера (на примере Хибинского массива) // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2010. Т. 13. № 4-1. С. 816–825.

*Мазухина С. И., Сандимиров С. С.* Применение физико-химического моделирования для решения экологических задач Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. 106 с.

*Мартынов В. Г.* Атлантический лосось *Salmo salar* L. на северо-востоке ареала (структура популяций, экология, хозяйственное значение). Дисс. докт. биол. наук. Сыктывкар, 2005. 503 с.

*Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В.* Влияние скорости ветрового потока и высоты хвостохранилища на уровень загрязнения атмосферы // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016в. № 3. С. 67–73.

*Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В.* Результаты моделирования процессов пыления хвостохранилищ // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016г. №1 (24). С. 59–68.

*Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В.* Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2016а. Т. 19. № 1/1. С. 13–19.

*Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В.* Эффект скорости ветрового потока на интенсивность пыления хвостохранилища // Успехи современного естествознания. 2016б. № 3. С. 177–182.

*Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Амосов П. В.* Компьютерное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Вестник КНЦ РАН. 2013. № 3. С. 44–50.

*Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Ригина О. Ю., Амосов П. В.* Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 2. С. 376–384.

*Рыбчак Н. В.* Ликвидация чрезвычайной ситуации на ЗАО «Беломорская нефтебаза» // Космические технологии для освоения, изучения, сохранения Арктики. 2011. Вып. 10. С. 80–83.

Справка о качестве поверхностных вод суши и морских вод на территории деятельности ГУ «Мурманское УГМС» за 2007 год (Мурманская область, Кандалакшский район). Мурманск: Центр мониторинга окружающей среды. 2008. 19 с.

*Стриженок А. В.* Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: Дис. ... канд. техн. наук. СПб. 2015. 184 с. Электронный ресурс: [www.spmi.ru/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/dissertaciya\\_strizhenok.pdf](http://www.spmi.ru/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/dissertaciya_strizhenok.pdf). Дата обращения: 12.09.2015.

Химия морей и океанов. М: Наука. 1995, 415 с.

*Швец В. М.* Органические вещества подземных вод как нефтепоисковые показатели // Органические вещества и микрофлора подземных вод и их нефтепоисковое значение: Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеологии и инж. Геологии. М.: ВСЕГИНГЕО. 1970. Вып. 26. С. 6–29. Режим доступа: <http://hydropetroleum.ru/node/48>. Дата обращения: 25.04.2017.

*Эрих В. Н.* Химия нефти и газа. Л.: Химия. 1969. 284 с.

*Amosov P. V., Baklanov A. A.* Dust Storms: on importance of tailing dump height // CRETE-2012: Proceedings of the 3-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management. Chania: Executive Summaries. Technical University of Crete. 2012. P. 123–124. [Электронный ресурс]. CD: [Crete2012e-Proceedings/data/pdf-files/S10.5.pdf](http://Crete2012e-Proceedings/data/pdf-files/S10.5.pdf).

*Amosov P. V., Baklanov A. A.* Assessment of dusting intensity on ANOF-2 tailing by using a Westphal D.L. dependency // X International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development. Proceedings. Bor: Tercija. 2015. P. 39–43.

*Amosov P. V., Baklanov A. A., Masloboev V. A., Mazihkina S. I.* CFD-model developing of dust transfer at a tailings dump // CRETE-2014: Proceedings of the 4-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management. Executive Summaries. Chania: Technical University of Crete. 2014. P. 279–280.

*Baklanov A., Rigina O.* Environmental modeling of dusting from the mining and concentration sites in the Kola Peninsula, Northwest Russia // The XI World Clear Air and Environment Congress, IUAPPA-NACA. Durban, 1998. Vol. 1. 4F-3. P. 1–18.

*Marticorena B., Bergametti G.* Modeling the Atmospheric Dust. Cycle 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme // Journal of Geophysical Research-Atmospheres. 1995. Vol. 100. № D8. P. 16415–16430.

*Mazukhina S., Masloboev V., Chudnenko K., Bychinsky V., Svetlov A., Muravyev S.* Monitoring and physical-chemical modeling of conditions of natural surface and underground waters forming in the Kola North // Journal of Environmental Science and Health. 2012. Part A. Vol. 47. Is. 05. P. 657–668.

*Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N.* A Case-Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust // Journal of the Atmospheric Sciences. 1988. № 45. P. 2145–2175.

#### **Сведения об авторе**

##### **Мазухина Светлана Ивановна,**

Кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты, Апатиты; simazukhina@mail.ru

##### **Mazukhina Svetlana Ivanovna,**

PhD (Chemistry), Senior Researcher, Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; simazukhina@mail.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.179-186

УДК 582

**Е. А. Боровичёв<sup>1</sup>, Д. Б. Денисов<sup>1</sup>, М. В. Корнейкова<sup>1</sup>, Л. Г. Исаева<sup>1</sup>,  
А. В. Разумовская<sup>1</sup>, Ю. Р. Химич<sup>1</sup>, А. В. Мелехин<sup>2</sup>, А. Л. Косова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,

<sup>2</sup>Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

#### **ГЕРБАРИЙ ИППЭС КНЦ РАН**

##### **Аннотация**

Гербарий ИППЭС КНЦ РАН организован в 1999 году на основе сборов афиллофоровых грибов, выполненных в период исследований наземных экосистем Мурманской области. В настоящее время гербарий состоит из основной коллекции (грибы — 1850 образцов; лишайники — 820; мохообразные — 1730; сосудистые растения — 1850) и двух специализированных коллекций, присоединенных в 2012 году, — «Микроорганизмы Кольского полуострова» (57 штаммов бактерий, 305 штаммов