

## **ЛЕТНИЙ СЦЕНАРИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАССЕЙВАНИЯ ПРИМЕСЕЙ ОТ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ**

*Эльза Андреевна Пьянова*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: pyanova@ommgp.sccc.ru

*Владимир Викторович Пененко*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: penenko@sccc.ru

*Лариса Михайловна Фалейчик*

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, Россия, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (302)220-61-27, e-mail: lfaleychik@bk.ru

Ветер в нижних слоях атмосферы является непосредственным переносчиком загрязняющих примесей от малых и средних объектов энергетики, находящихся вблизи акватории озера Байкал. Для оценок влияния различных метеорологических ситуаций на процессы переноса примесей на акваторию используется мезомасштабная модель динамики атмосферы и переноса примесей, разрабатываемая в ИВМиМГ СО РАН. Представлены результаты численного моделирования локальных циркуляций в Байкальском регионе в летний период. Показана пространственная и временная изменчивость ветрового потока и динамика распределения примесей в условиях модельного сценария.

**Ключевые слова:** гидротермодинамика и качество атмосферы, математическое моделирование атмосферных процессов, природоохранное прогнозирование.

## **SUMMER SCENARIO OF MODELING DISPERSION OF IMPURITIES FROM EMISSIONS SOURCES IN THE CENTRAL ENVIRONMENTAL ZONE OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY**

*Elza A. Pyanova*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: pyanova@ommgp.sccc.ru

*Vladimir V. Penenko*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: penenko@sccc.ru

*Larisa M. Faleychik*

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, 16a, Nedorezov St., Chita, 672014, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (302)220-61-27, e-mail: lfaleychik@bk.ru

The wind in the lower layers of the atmosphere is a direct distributor of pollutants from small and medium energy facilities located near the waters of Lake Baikal. To assess the effect of various meteorological situations on the processes of impurity transport to the water area, a mesoscale model of atmospheric dynamics and impurity transport is used, which is being developed in ICM & MG SB RAS. The results of numerical modeling of local circulations in the Baikal region in the summer period are presented. The spatial and temporal variability of wind flow and the dynamics of the distribution of impurities in the model scenario are shown.

**Key words:** atmospheric dynamics, air quality, mathematical modeling of atmospheric processes, environmental prediction.

### *Введение*

Объектом данного исследования является атмосфера Байкальской природной территории (БПТ). Здесь находится участок Всемирного природного наследия ЮНЕСКО, включающий в себя акваторию озера Байкал и его прибрежную территорию. На БПТ расположено несколько десятков особо охраняемых природных территорий и сотни памятников природы. Состояние атмосферы БПТ, ее качество влияют на состояние экосистем, в том числе и на экологическую систему озера. Особое внимание в работе уделяется методам математического моделирования для анализа качества атмосферы над акваторией Байкала.

Основными антропогенными источниками атмосферных загрязнений, оказывающих негативное воздействие на качество атмосферы над Байкалом, являются Иркутско-Черемховский промышленный узел, выбросы которого достигают акватории Байкала при западном и северо-западном ветрах, Гусиноозерская ГРЭС и Улан-Удэнский энергетический комплекс, загрязняющие выбросы которых приносятся восточными ветрами [1, 2]. Кроме того, в непосредственной близости к побережью Байкала, в центральной экологической зоне, располагаются много мелких и средних котельных и две ТЭЦ – Байкальская и Тимлюйская. В атмосферных выбросах источников этой зоны преобладают твердые взвеси, отходящие от угольных котельных. Хотя общее количество выбросов от этих котельных и ТЭЦ заметно уступает объему выбросов крупных промышленных топливно-энергетических узлов [3, 4], экологический ущерб, наносимый близлежащим территориям, может оказаться существенным.

Выявление и изучение наиболее неблагоприятных метеорологических условий, в контексте переноса загрязняющих примесей на акваторию озера, может помочь обосновать природоохранные мероприятия и запланировать первоочередность модернизации очистных сооружений или перехода на другие виды топлива топливно-энергетических объектов на побережье Байкала.

Методология нашего исследования предполагает воспроизведение сценариев метеорологических ситуаций и особенностей распространения атмосферных примесей, характерных для изучаемой территории [5]. В данной работе представлены результаты одного из сценариев моделирования, описывающего метеорологический режим и рассеивание пассивных примесей от точечных источников выбросов, расположенных на побережье Байкала, в летний период.

## Методика выполнения численных расчетов

Для описания циркуляционных режимов атмосферы мы используем мезомасштабную негидростатическую модель динамики атмосферы, разрабатываемую в ИВМиМГ СО РАН и адаптированную к орографическим особенностям Байкальского региона. Выпишем основные уравнения модели:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div} \rho u \vec{u} &= -\frac{\partial p'}{\partial x} + l \rho v + \Delta_u u, & \frac{\partial \rho \vartheta'}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vartheta' \vec{u} &= -S \rho w - \frac{\rho L \Phi}{c_p} + \Delta_\theta \vartheta', \\
 \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v \vec{u} &= -\frac{\partial p'}{\partial y} - l \rho u + \Delta_v v, & \frac{\partial \rho q'}{\partial t} + \operatorname{div} \rho q' \vec{u} &= \rho \Phi - \rho w \frac{\partial \bar{Q}}{\partial z} + \Delta_q q', \\
 \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div} \rho w \vec{u} &= -\frac{\partial p'}{\partial z} + \lambda \rho \vartheta' + \Delta_w w, & \operatorname{div} \rho \vec{u} &= 0, \\
 \Delta_\alpha &= \frac{\partial}{\partial x} \mu_{\alpha x} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_{\alpha y} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_{\alpha z} \frac{\partial}{\partial z}, \quad (\alpha = u, v, w, \theta, q),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $t$  – время,  $x, y, z$  – декартовы координаты,  $\vec{u} = (u, v, w)$  – вектор скорости ветра,  $\rho(z)$  – плотность,  $\vartheta', q', p'$  – отклонения потенциальной температуры, массовой доли пара, давления от их фоновых значений,  $\bar{Q}$  – фоновое значение массовой доли водяного пара,  $\mu_{\alpha x}, \mu_{\alpha y}, \mu_{\alpha z}$  – коэффициенты турбулентного обмена,  $l, S, \lambda$  – параметры Кориолиса, стратификации и плавучести,  $\Phi$  – скорость фазовых переходов между парообразной, облачной и дождевой влагой,  $L$  – скрытая теплота конденсации,  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Фоновые поля, описывающие крупномасштабные атмосферные движения, предполагаются заданными. Уравнения в отклонениях выделяют возмущения, вызванные факторами локального характера, прежде всего влиянием рельефа местности и неоднородностями температуры подстилающей поверхности.

Для описания процессов рассеивания пассивных примесей система уравнений (1) дополняется конвективно-диффузионным уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_c) \frac{\partial c}{\partial z} = \Delta_c c + f(x, y, z, t), \tag{2}$$

где  $c$  – концентрация пассивной примеси,  $w_c$  – скорость оседания примеси,  $f$  – функция источников примеси.

Система уравнений (1)-(2) замыкается начальными и граничными условиями и решается численно. Для этого на основе вариационно-разностного подхода были построены монотонные, транспортные конечно-разностные схемы второго порядка по пространству [6]. Учет рельефа осуществляется на основе идей метода фиктивных областей [7]. Подробнее с описанием модели и построением численных алгоритмов можно ознакомиться в работах [5-8].

Для проведения сценарного моделирования была выбрана территория протяженностью 1320 км с запада на восток и 1 270 км с юга на север (рис. 1); на ней была построена прямоугольная расчетная сетка, равномерная по горизонтали, с шагами  $\Delta x = \Delta y = 5$  км. По вертикали сетка сгущалась к рельефу и была более разреженной у верхней границы модельной области. Шаги по вертикали  $\Delta z = 100-200$  м. Всего  $265 \times 255 \times 50$  узлов. Используемый в модели базовый шаг по времени  $\Delta t = 60$  с.

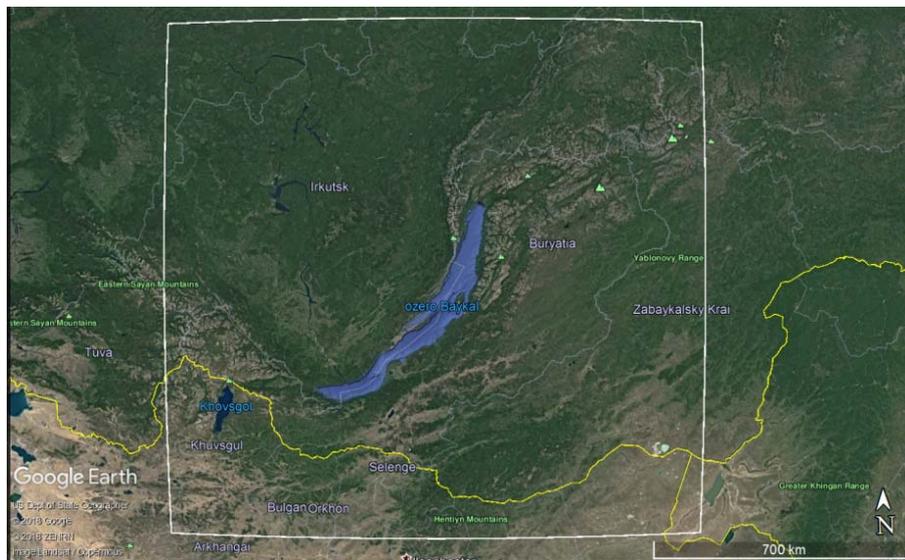


Рис. 1. Область моделирования

Источник данных о рельефе области моделирования – находящиеся в свободном доступе данные SRTM 4 [9]. Их извлечение и подготовка для использования в численной модели выполнены с использованием ГИС-технологий [5, 10].

Для выполнения «летнего» численного сценария в качестве начальных распределений полей метеоэлементов мы использовали прогностические поля глобальной модели NSEP GFS, адаптированные к ограниченной расчетной области (48.0 - 59.83 градусов с.ш. и 96.29 - 119.59 градусов в.д.) с учетом географических особенностей региона. На открытых боковых границах области задавались однородные условия Неймана, на верхней границе – условия выхода полей метеоэлементов на их крупномасштабные фоновые значения. Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью учитывалось через параметризационную модель приземного слоя [11].

Поля примеси на начало расчета были заданы нулевыми.

### *Результаты и обсуждение*

Модельные источники выбросов задавались в узлах расчетной сетки, наиболее близко расположенных к действующим котельным и ТЭЦ (рис. 2). Источники выбросов считались точечными, постоянно действующими; мощность каж-

дого источника составляла 1 условную единицу в секунду. Высота всех источников – 100 м. Примесь пассивная, невесомая ( $w_c = 0$  м/с).

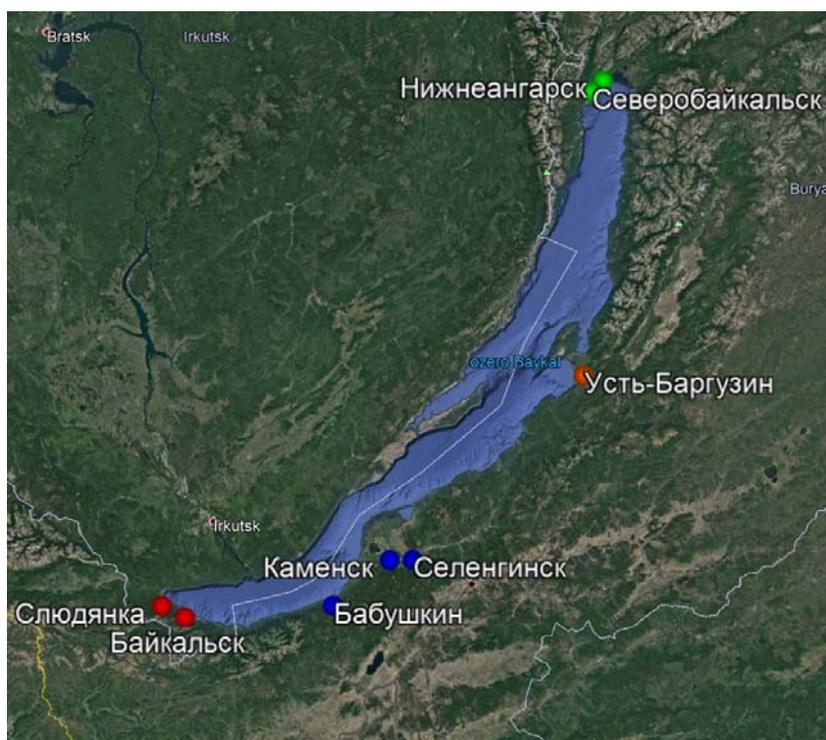


Рис. 2. Фрагмент области моделирования. Разноцветными кружочками выделены четыре группы модельных источников выбросов

Как было отмечено выше, в качестве начальных распределений метеорологических полей были взяты поля глобальной прогностической модели, а именно сценарий, соответствующий 20 августа 2015 г. В этот период наблюдалась сухая жаркая погода, поле ветра имело неоднородную пространственную структуру, в которой можно выделить преобладание восточного переноса над центральной экологической зоной БПТ и в долине реки Ангары.

В этом численном эксперименте пассивную примесь мы рассматриваем как трассер, позволяющий оценить основные направления распространения возможных выбросов загрязняющих примесей. В данной работе не учтены различия в объемах реальных выбросов от заданных источников, а также размеры выпадающих частиц и скорость их осаждения. Эти поправки предполагается внести при проведении аналогичных расчетов на сетке с более детальным разрешением по пространству.

На рис. 3 представлены распределения полей концентрации пассивной примеси от заданных условных источников выбросов. Цветные изолинии отражают перенос соответствующих трассеров от отдельных групп источников: на севере – от промышленных объектов Северобайкальска и Нижнеангарска (зеленый), на юге – от источников Байкальска и Слюдянки (красный), на юго-восточном побережье – от источников Кабанского района (синий), на востоке – от источников

Баргузинского (оранжевый) района. Внешняя изолиния для каждого источника соответствует значению 0.1 условной единицы, внутренняя – 10 условным единицам. Черными линиями выделены контуры водоемов.

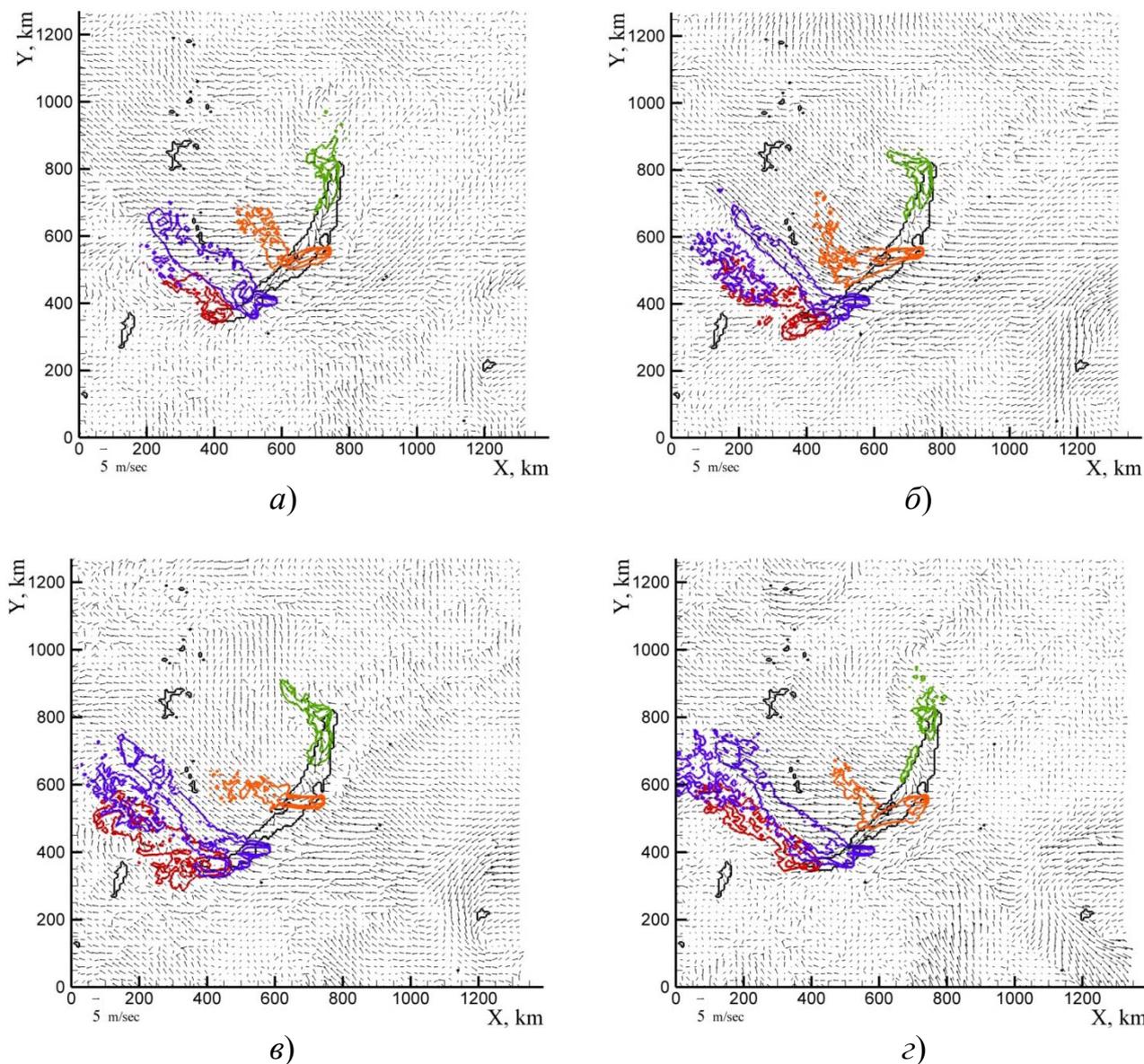


Рис. 3. Поле ветра и изолинии концентрации пассивных примесей (усл. ед.) на высоте 100 м над поверхностью в различные моменты времени:

а) 5 ч, б) 10 ч, в) 14 ч, г) 20 ч

Из ситуаций, представленных на рис. 3, видно, что в условиях моделируемого сценария рассеивание выбросов от источников на восточном побережье озера в основном происходит в направлении акватории Байкала. Такое поведение трассеров объясняется преобладанием в средней и южной частях Байкала воздушного переноса восточных румбов, что в свою очередь обусловлено заданием начального и фонового распределений метеорологических полей в чис-

ленном сценарии. При этом в южной оконечности озера сформировавшиеся ветровые потоки благоприятствуют рассеиванию примеси без активного переноса на акваторию Байкала. В северной части озера – более сложные картины рассеивания примесей. Преобладает перенос в южном направлении с отклонением части шлейфа на запад. При этом можно наблюдать и вынос невысоких концентраций в северо-западном и северном направлении. С большой вероятностью, такому распространению примесей способствует ориентация хребтов на севере Байкала. Чтобы подтвердить влияние горно-долинных и бризовых эффектов на распределение трассера в расчетном сценарии, необходимо провести моделирование на более подробной сетке, детальнее описывающей функцию рельефа территории.

Данные расчеты представляют интерес в качестве предварительных оценок поведения воздушных масс вблизи Байкала. Как показали расчеты, при преобладающем восточном фоновом переносе именно источники центральной экологической зоны являются наиболее вероятными загрязнителями воздушной акватории Байкала. При проведении расчетов на сетке с более мелким шагом можно будет точнее учесть влияние бризовых и горно-долинных эффектов, и провести более точные количественные оценки концентраций, достигающих акватории озера.

Представленные результаты расчетов рассеивания невесомых примесей качественно согласуются с результатами исследований по оценке пространственного распределения газовых примесей, проводимых для атмосферы Южного Прибайкалья в работе [12].

### *Заключение*

Представленные результаты расчетного летнего сценария показывают один из вариантов развития метеорологической ситуации в Байкальском регионе. Результаты моделирования позволяют оценить суточную изменчивость ветровых потоков и динамику загрязняющих шлейфов в районе Байкала. Они также дополняют наши более ранние исследования процессов формирования атмосферных циркуляций и переноса примесей в Байкальском регионе [13, 14].

Следует отметить, что, несмотря на то, что распределения рассмотренных пассивных примесей не отражают полностью реальных процессов осаждения загрязняющих выбросов от котельных вокруг Байкала, в то же время такого рода расчеты позволяют оценить основные направления воздушного переноса в нижних слоях атмосферы, где и происходит рассеивание выбросов от малых и средних объектов энергетики. Расчетные поля данного летнего сценария будут использованы в дальнейших численных экспериментах для задания граничных условий при уточняющих расчетах на вложенной сетке с более подробным разрешением.

*Работа в части развития базовых математических моделей выполняется в рамках темы государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2016-0004,*

*а проведение исследований для Байкальского региона при поддержке РФФИ 17-29-05044. Совершенствование технологии геоинформационного сопровождения исследования – в рамках темы № 0386-2017-0008 госзадания ИПРЭК СО РАН.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Ижбулдин А.К., Майсюк Е.П. Экологические проблемы энергетики Байкальской природной территории и возможные пути их решения // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. – Иркутск : ИГ СО РАН, 2015. – С. 206-212.
2. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Ходжер Т.В., Чипанина Е.В. Дальний перенос шлейфов атмосферных выбросов региональных угольных ТЭЦ на акваторию Южного Байкала // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 60-65.
3. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Майсюк Е.П., Тугузова Т.Ф. Внедрение природоохранных мероприятий в теплоэнергетике центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 7. – С. 20-25.
4. Майсюк Е.П. Роль энергетики в экологическом состоянии Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 100-107.
5. Пьянова Э.А., Фалейчик Л.М. Информационно-вычислительная технология для сценарных оценок динамики и качества атмосферы // Вычислительные технологии. – 2012. – Т. 17, № 1. – С.109-119.
6. Penenko V., Tsvetova E. Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // J. of Computation and Applied Mathematics. – 2009. – Vol. 226, iss. 1. – P. 319-330.
7. Алоян А.Е., Фалейчик А.А., Фалейчик Л.М. Алгоритм численного решения метеорологических задач в случае криволинейной области // Математические методы рационального природопользования. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 14-35.
8. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука, 1985. – 256 с.
9. Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database. – 2008. <http://srtm.csi.cgiar.org>
10. Фалейчик Л.М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 14-24.
11. Казаков А.Л., Лыкосов В.Н. О параметризации взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью при численном моделировании атмосферных процессов // Труды ЗапСибНИИ. – 1982. – Вып. 55. – С. 3-20.
12. Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Латышева И.В., Ходжер Т.В. Оценки пространственного распределения малых газовых примесей над акваторией озера Байкал в летний период с помощью полевых измерений и результатов математического моделирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2016. – Т. 18. – С. 69-80.
13. Ryanova E.A., Penenko V.V., Faleychik L.M. Simulation of atmospheric dynamics and air quality in the Baikal region // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929247 (November 25, 2014) [Electronic resource]. – Англ. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2074998>.
14. Пьянова Э.А., Фалейчик Л.М. Сценарное моделирование процессов переноса примеси в атмосфере южного Прибайкалья // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2015. – № 8 (123). – С. 30-38.

© Э. А. Пьянова, В. В. Пененко, Л. М. Фалейчик, 2019