

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗИМНЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Эльза Андреевна Пьянова

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

Для оценки влияния источников загрязняющих примесей на атмосферу акватории Байкала модель ИВМиМГ СО РАН адаптируется к географическим и климатическим условиям Байкальского региона. Выполнены два сценарных расчета, описывающих характерные циркуляции зимней атмосферы в условиях, когда Байкал покрыт льдом и при наличии открытой поверхности воды. Рассмотрены варианты переноса пассивной примеси со стороны Иркутска северо-западным потоком, смоделированным в этих сценариях. При одинаковых крупномасштабных входных данных концентрации примеси, достигающей акватории озера, были меньше в сценарии с замерзшим Байкалом. Общее предварительное сравнение результатов расчетов показало, что влияние различия в теплофизических свойствах поверхности Байкала в указанных сценариях проявляется в атмосфере окружающей территории на расстояниях порядка ширины озера.

Ключевые слова: гидротермодинамика и качество атмосферы, математическое моделирование, атмосферные процессы, природоохранное прогнозирование.

SIMULATION OF WINTER CIRCULATION OF THE ATMOSPHERE OVER THE BAIKAL REGION

Elza A. Pyanova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, prospect Akademika Lavrentjeva, 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 Akademika Lavrentjeva, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., professor, chief research scientist, phone: (383)330-61-52, e-mail: penenko@sscc.ru

In order to assess the influence of sources of pollutants on the atmosphere of the Lake Baikal water area, the ICMMG SB RAS model is adapted to the geographical and climatic conditions of the Baikal region. Two scenario calculations describing the characteristic circulation of the winter atmosphere in conditions when Lake Baikal is covered with ice and those in the presence of an open water surface were performed. Some variants of passive impurity transfer from Irkutsk by the North-West wind flow simulated in these scenarios are discussed. With the same large-scale input data, the impurity concentrations reaching the lake's water area were lower in the scenario with frozen Lake

Baikal surface. A preliminary comparison of the results of calculations has shown that the influence of differences in the thermal properties of the surface of Lake Baikal in these scenarios is manifested in the atmosphere of the surrounding territory at distances of the order of the width of the lake.

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

Введение

Озеро Байкал – это огромный водоем, который в значительной мере влияет на формирование атмосферных циркуляций над прилегающими территориями. Окружающие озеро высокие хребты тоже вносят свой вклад в формирование воздушных потоков. Развитие температурных инверсий, особенно частых в холодное время года, может способствовать образованию интенсивных струйных течений. Ситуация, когда в Южном Прибайкалье образуются струи северо-западного направления, может оказаться очень неблагоприятной, поскольку в долине реки Ангары располагаются крупные промышленные предприятия Иркутско-Черемховского комплекса. Если выбросы этих предприятий попадут в такую струю, то заметная их часть может вынестись на акваторию Байкала [1].

Цель нашей работы – разработать версию мезомасштабной модели, которая бы воспроизводила для Байкальского региона зимние характерные условия, в том числе и описанные выше, чтобы в дальнейшем использовать модель динамики атмосферы для проведения оценок качества атмосферы Байкальского региона.

В работе описаны предварительные сценарные расчеты, представляющие результат адаптации мезомасштабной модели ИВМиМГ СО РАН к географическим и зимним климатическим условиям Байкальского региона.

Методика численного сценарного моделирования

Мезомасштабная атмосферная модель ИВМиМГ СО РАН представляет собой систему дифференциальных уравнений с граничными условиями и различными схемами замыкания модели. Основные уравнения этой системы описывают трехмерное движение атмосферы, приток тепла и влаги с учетом фазовых переходов. В качестве замыкающих моделей для нахождения коэффициентов турбулентности используются: модель Смагоринского [2] – горизонтальные коэффициенты, и *k-e*-модель [3] – вертикальный коэффициент. Скорости фазовых переходов влаги рассчитываются в соответствии с методикой из работы [4].

Модель ИВМиМГ нацелена на проведение сценарных расчетов над ограниченными территориями со сложной орографией подстилающей поверхности. Учет рельефа в модели основан на идеях метода фиктивных областей [5]. Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью в модели описывается через граничные условия третьего рода, которые получаются в результате использование параметризационной модели приземного слоя [6]. В модели также рассчитывается суточный ход температуры подстилающей поверхности [7].

Модель ИВМиМГ не предназначена для оперативных прогнозов и не предполагает постоянную компиляцию с глобальными прогностическими моделями атмосферы. Поскольку чаще всего оперативной информации о данных на границах области у нас нет, мы ставим однородные условия Неймана на всех открытых границах области моделирования.

Для сценарных исследований была выбрана территория в пределах 48 - 60° с.ш. и 96 -120° в.д. (рис. 1). Область включает в себя озеро Байкал и окаймляющие его хребты. Выбор большой территории должен позволить смоделировать основные ветровые потоки, обусловленные влиянием орографии. «Обрезка» территории может привести к ошибкам на границе области моделирования за счет выпадения из рассмотрения значимых (в контексте влияния на формирование ветровых потоков) орографических объектов. По вертикали моделирование велось до высоты 6050 м над уровнем моря.

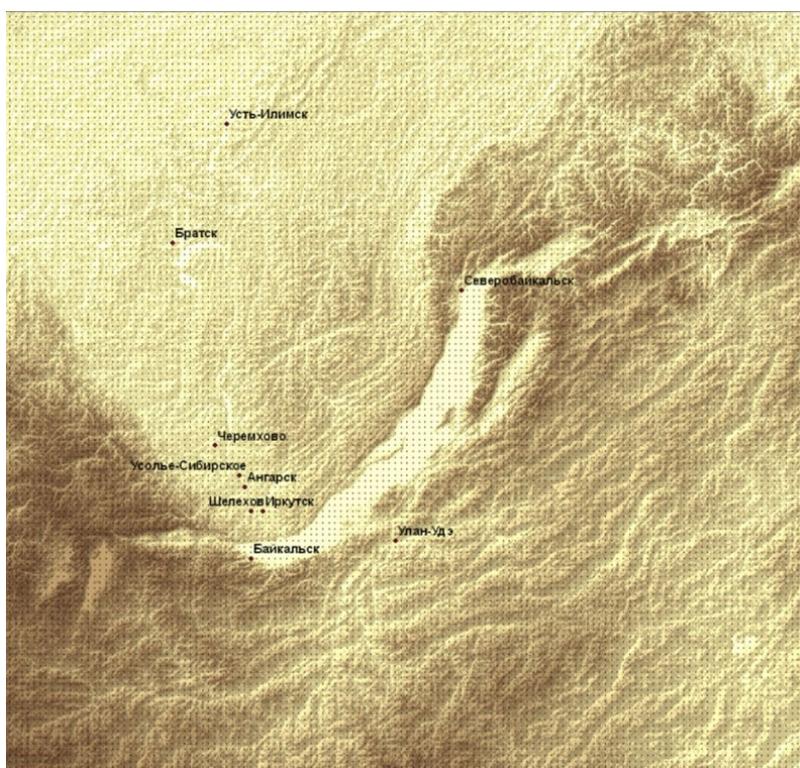


Рис. 1. Область моделирования

Для замыкания модели необходимо было задать начальные распределения метеорологических полей во всей трехмерной области моделирования. В этой работе в качестве таких данных мы взяли метеорологические поля, полученные для Байкальского региона по мезомасштабной прогностической модели COSMO. Расчет был выполнен для 17 ноября 2019 года. Данные расчета на 00 ч UTC были предоставлены ФБГУ «СибНИГМИ». Для использования в нашей модели прогностические поля были интерполированы с сетки модели COSMO на расчетную сетку модели ИВМиМГ.

Уравнения модели динамики атмосферы решались численно. На основе вариационного принципа были построены балансные конечно-разностные аппроксимации [8]. Система разностных уравнений расщеплялась по физическим процессам. На этапе переноса с диффузией использовались монотонные транспортные схемы [9]. Подробнее описание уравнений модели и построения численных схем аппроксимации можно найти в работах [8-10].

Для численной реализации уравнений динамики атмосферы в заданной области моделирования построена прямоугольная сетка $596 \times 568 \times 50$ узлов с горизонтальными шагами 2,2 км. По вертикали шаг менялся от 100 до 200 м: сетка сгущалась у поверхности и становилась более разреженной к верхней границе.

Сценарные расчеты динамики атмосферы над выделенной территорией Байкальского региона проводились на 24 часа. Моделирование предполагало расчет суточного хода основных полей метеорологических элементов. Источником возмущений полей является неравномерное поступление солнечной радиации на подстилающую поверхность. Мы предположили также, что на верхней границе расчетной области ветровой поток связан с внешними воздействиями, поэтому на период расчета было зафиксировано начальное распределение поля ветра. За время сценария внутри области происходит адаптация поля скорости ветра к термодинамическим характеристикам подстилающей поверхности. То есть здесь воспроизводилось изменение начального состояния атмосферы, полученного по модели COSMO, в результате неравномерного прогрева подстилающей поверхности и заданного внешнего ветрового потока на верхней границе. Других источников возмущений атмосферы в сценарных расчетах не предполагалось.

Результаты и обсуждение

Были рассмотрены два сценария. В первом сценарном расчете поверхность Байкала – это открытая вода (сценарий 1), ее температура в течение модельного времени не менялась. Во втором – поверхность Байкала покрыта льдом (сценарий 2). Все остальные параметры модели и начальные распределения метеорологических полей для этих двух сценариев были одинаковыми.

Сравнение результатов моделирования по этим двум сценариям показало, что при заданных фоновых условиях влияние открытой воды Байкала распространялось на территории вокруг озера порядка ширины самого водоема. Чем дальше от Байкала, тем более близкие расчетные поля получались по двум описанным сценариям. Это хорошо видно на рисунках 2 и 3. На них представлены поля ветра на высоте 100 м над поверхностью через 24 ч модельного времени. В обоих сценариях формируются ветровые движения вдоль основных горных хребтов, окаймляющих Байкал. Основные различия в приземном поле ветра проявляются над поверхностью Байкала и вдоль береговой линии.

В сценарии 1 с открытой водой озера на нижнем расчетном уровне на высоте 100 м над Байкалом сформировались сильные потоки ветра более 10 м/с (рис. 2). В то время как над покрытой льдом поверхностью во втором сценарии ветер не превышал 5 м/с (рис. 3). В отличие от картин распределения поля ветра

в средней части и на севере озера Байкал, в самой южной части Байкала поля ветра в обоих сценариях были схожи. Предполагаем, что в рассмотренных сценариях одним из основных факторов формирования атмосферной циркуляции в Южном Прибайкалье является устойчивый северо-западный ветер из долины реки Ангары.

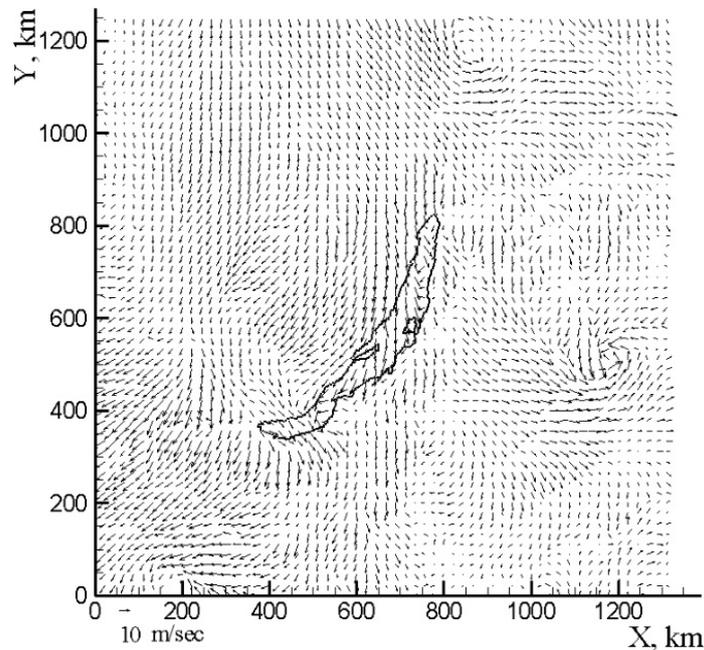


Рис. 2. Поле ветра на высоте 100 м над поверхностью через 24 ч с начала расчета. Расчетный сценарий 1 с открытой водой на Байкале.

Стрелочки поля ветра нарисованы только в каждой десятой точке расчетной сетки.

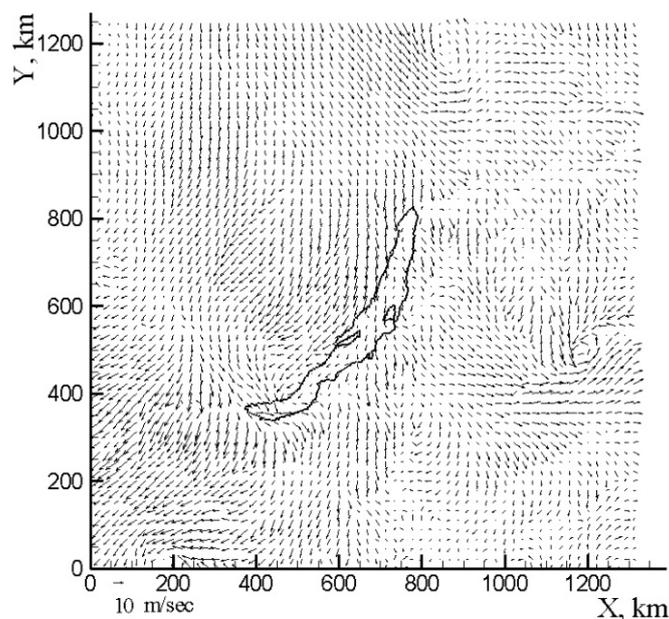


Рис. 3. То же самое, что и на рис. 2, но для сценария 2 – поверхность Байкала покрыта льдом.

Для иллюстрации влияния качества воздуха в долине реки Ангары на состав атмосферы акватории Байкала мы смоделировали перенос и рассеивание трасера от условного источника, расположенного в Иркутске. Источник был задан на высоте 200 м над поверхностью, мощность постоянно действующего источника – 1 условная единица. Примесь пассивная, невесомая.

На рисунках 4 и 5 даны расчетные поля ветра и изолинии концентрации примеси, полученные по каждому из сценариев в разные моменты времени с начала расчета. На рисунках видно, что в обоих случаях примесь достигает акватории Байкала, а более слабые концентрации наблюдаются и на противоположном берегу озера (рис. 4, 5).

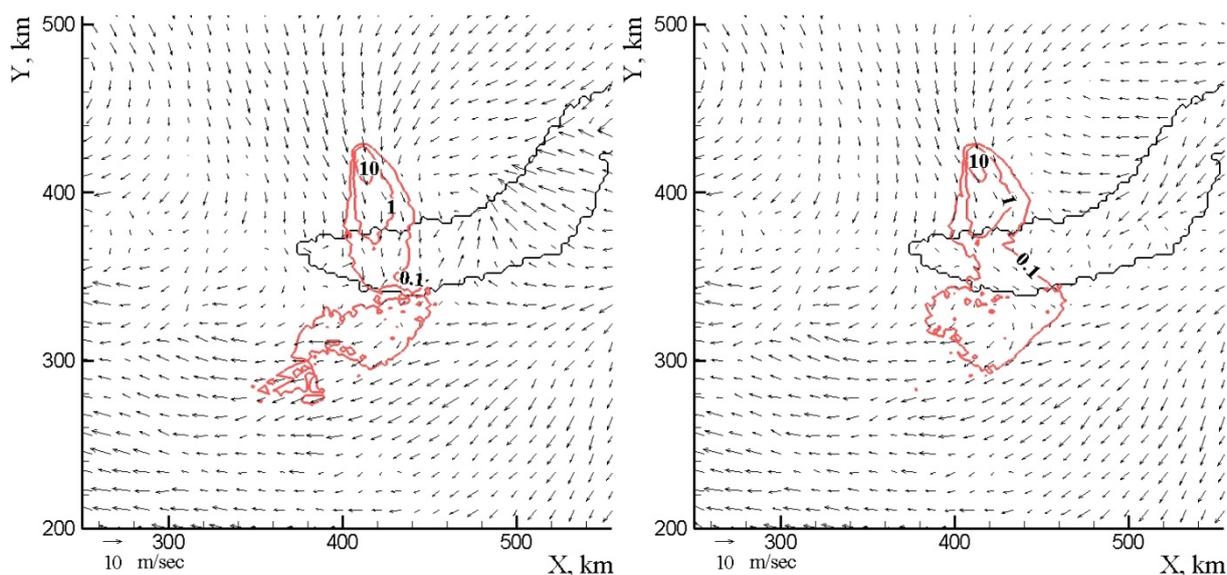


Рис. 4. Фрагмент области моделирования. Поле ветра и изолинии концентрации пассивных примесей (усл. ед.) на высоте 100 м над поверхностью через 12 ч с начала расчета: сценарий 1 – слева, сценарий 2 – справа. Стрелочки нарисованы только в каждой пятой точке расчетной сетки. Значение изолиний: 10, 1 и внешняя – 0.1 условной единицы.

Для Байкальского региона западные и северо-западные ветры являются характерными. В таких условиях вынос загрязняющих примесей от источников Иркутско-Черемховского промышленного комплекса фиксируется станциями наблюдений и пробами снежного покрова на озере Байкал [1, 11 и др.]. Представленные сценарии моделирования описывают одну из таких характерных ситуаций в зимний период. При этом, как показывают наши расчеты, несмотря на качественную схожесть направления распространения загрязнений в Южном Прибайкалье в условиях сценариев 1 и 2, открытая вода на Байкале может способствовать выносу примеси в больших концентрациях в атмосферу акватории Байкала, чем в случае, когда озеро покрыто льдом. Предположительно это объясняется тем, что открытая вода Байкала, будучи более теплой, чем окружающие территории, усиливает потоки ветра на озеро со стороны суши, в том числе и со стороны долины Ангары.

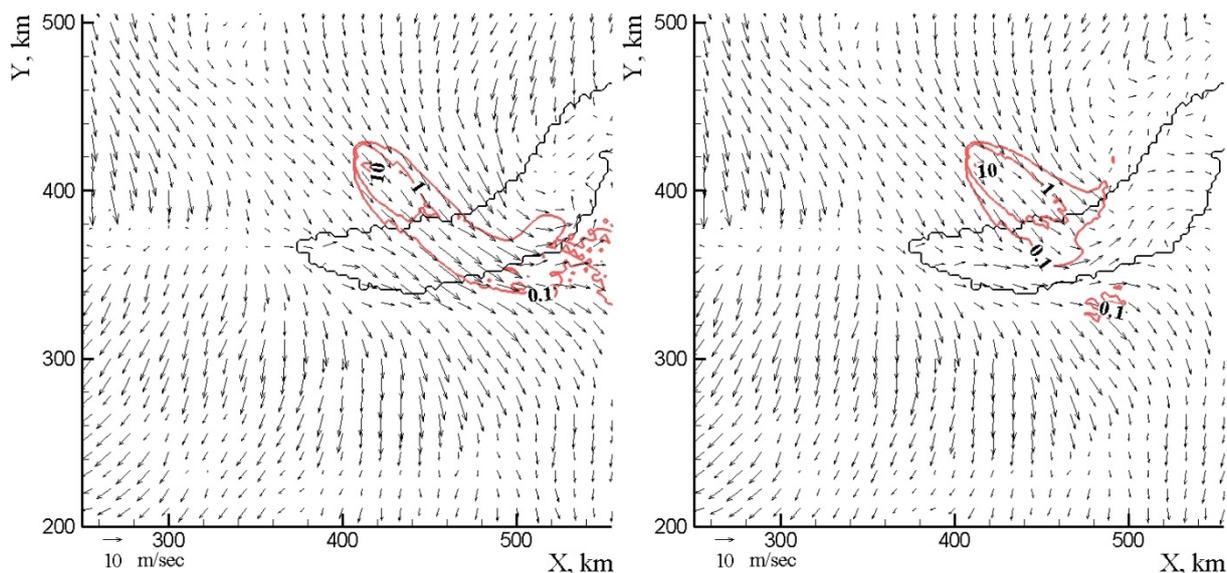


Рис. 5. То же самое, что на рис. 4, но для 21 ч с начала расчета: сценарий 1 – слева, сценарий 2 – справа.

В работе представлен предварительный анализ расчетов по двум модельным сценариям. Структура трехмерных метеорологических полей довольно сложная и поэтому требует дополнительного изучения. Также предполагается моделирование и других зимних метеорологических условий, в том числе и при установлении Сибирского антициклона, когда над большей частью территории региона устанавливается маловетренная погода.

Заключение

Полученные по мезомасштабной атмосферной модели ИВМиМГ СО РАН результаты сценариев моделирования зимних условий атмосферы в Байкальском регионе описывают варианты развития метеорологической ситуации при замерзшем Байкале и при наличии открытой воды. В обоих сценариях наблюдалось формирование ветровых потоков вдоль основных горных хребтов региона. Основные различия расчетных метеорологических полей фиксировались над акваторией Байкала: усиление ветра над поверхностью озера в сценарии с открытой водой, и более слабые потоки надо льдом. Различия проявились и при моделировании переноса примеси от источника выбросов, расположенного в Иркутске. В сценарии с Байкалом, покрытым льдом, акватории озера достигали примеси в меньших концентрациях, чем в сценарии с открытой водой. В расчетах не учитывались процессы осаждения примесей.

Модель предполагается использовать для дальнейших исследований и оценок влияния различных метеорологических условий региона на рассеивание примесей от загрязняющих источников.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность ФГУП «СибНИГМИ» за предоставленные данные.

Работа в части развития базовых математических моделей выполняется в рамках темы государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2019-0004, а проведение исследований для Байкальского региона – при поддержке РФФИ 17-29-05044.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina Y.V., Marinayte I.I. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region // *International Journal of Environmental Studies*. – 2014. – V. 7, № 13.
2. Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.L. Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere // *Monthly Weather Review*. – 1965. – V. 93. – P. 727-768.
3. Langland R.H., Liou C.-S. Implementation of an E-e parametrization of vertical subgrid-scale mixing in regional model // *Monthly Weather Review*. – 1996. – V. 124. – P. 905-918.
4. Hurley P.J. The Air Pollution Model (TAPM) Version 3. Part 1: Technical Description / CSIRO Atmospheric Research Technical Paper. – 2005. V. 71. – P. 4–7.
5. 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.
6. 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.
7. Казаков А.Л., Леженин А.А. Метод определения температуры подстилающей поверхности в моделях пограничного слоя атмосферы // *Метеорология, климатология и гидрология*. – 1998. – № 35. – С. 158–174.
8. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука, 1985. – 256 с.
9. Penenko V.V., Tsvetova E.A. Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // *J. of Computation and Applied Mathematics*. – 2009. – V. 226, №2. – P 319–330.
10. Ryanova E.A., Penenko V.V. and Faleychik, L. M. Numerical modeling of atmospheric dynamics and pollutant transport over the regions with inhomogeneous orography // *AIP Conference Proceedings 2027: 030101*. – 2018.
11. Оболкин В.А., Шаманский Ю.В., Ходжер Т.В., Фалиц А.В. Мезомасштабные процессы переноса атмосферных загрязнений в районе Южного Байкала // *Океанологические исследования*. – 2019. – Т. 47, № 3. – С. 104–113

© Э. А. Пьянова, В. В. Пененко, 2020