



УДК 551.588.74

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.111>

## Особенности вертикального распределения аэрозолей и газовых примесей в регионе оз. Байкал

В. Л. Потемкин

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

И. В. Латышева

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

В. Л. Макухин

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

Т. Г. Потемкина

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

**Аннотация.** С помощью нелинейной нестационарной пространственной эйлеровой модели исследовались процессы распространения и трансформации твердых взвесей, соединений серы и азота в долине р. Ангары и над Байкалом. Учитывались выбросы предприятий Иркутско-Черемховского, Нижнеселенгинского, Улан-Удэнского, Южно- и Северобайкальского промышленных узлов. Построены карты-схемы распределения загрязняющих веществ у поверхности земли и на других уровнях. Выполнены оценки осаждения твердых взвесей на подстилающую поверхность рассматриваемого региона. Установлено, что на площадь  $200 \times 200 \text{ км}^2$  осажается 95 % от выбросов частиц радиусом до 20 мкм. Оценен вклад предприятий Приангарья, Прибайкалья и Забайкалья в загрязнение оз. Байкал сульфатами и нитратами при атмосферных выбросах. Определено, что наибольшее влияние на озеро оказывают выбросы предприятий Слюдянки и Байкальска, их вклад составляет 53 % сульфатов и 64 % нитратов. Значительно меньше оценивается влияние Иркутско-Черемховского промышленного комплекса – 18 и 25 % соответственно. Менее значимый вклад этого комплекса объясняется удаленностью источников выбросов от озера и наличием орографических неоднородностей, препятствующих переносу примесей. Вклад источников выбросов предприятий Забайкалья составляет 29 % по сульфатам и 21 % по нитратам. Вклад предприятий Северобайкальска незначителен.

**Ключевые слова:** озеро Байкал, Ангара, твердые взвеси, сульфаты, нитраты, численная модель.

**Для цитирования:** Особенности вертикального распределения аэрозолей и газовых примесей в регионе оз. Байкал / В. Л. Потемкин, И. В. Латышева, В. Л. Макухин, Т. Г. Потемкина // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 111–121. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.111>

## Введение

О негативном влиянии на окружающую среду выбросов промышленными предприятиями загрязняющих веществ опубликовано много работ [например, Акулов, 2014; Аргучинцев, Аргучинцева, 2007; Голицын, 2010; Дегодя, Мальцева, 2016; Федяева, 2007; Strizhenok, Ivanov, 2016; Environmental regulation and ... , 2014]. Исследования в этом направлении ведутся как путем тщательных измерений с помощью современного оборудования, так и на основе пространственных численных моделей. В работе [Li, Britter, Norford, 2016] с помощью метода моделирования крупных вихрей (модель LES) исследуются процессы переноса над уличным каньоном при устойчивой стратификации. Модель LES использовалась для изучения влияния термической стратификации на процессы рассеивания в городских условиях центра Лондона [Xie, Hayden, Wood, 2013]. В [Liang, Fu, Wang, 2016] исследовались процессы переноса сульфатов, нитратов, аммония над районом Северо-Востока США с помощью модели на базе разработанного в статье метода расщепления. С использованием нелинейной нестационарной эйлеровой модели, основанной на численном решении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примеси [Аргучинцев, Аргучинцева, 2007], исследовалось влияние метеорологических условий на распространение и трансформацию диоксида серы в районе пос. Листвянка на Байкале [Особенности пространственного распределения ... , 2014; Low-level atmospheric jets ... , 2014; Оценки пространственного распределения ... , 2016], оценивался вклад местных и удаленных источников выбросов в формирование газовых примесей в районе Южного Байкала [Макухин, Оболкин, Потемкин, 2014].

## Цель и методы исследования

Целью данной работы являлось исследование экологического состояния атмосферы в регионе оз. Байкал в зависимости от метеорологических условий и выбросов различных источников загрязнения. Для решения поставленной проблемы использовалась математическая модель распространения и трансформации примесей [Аргучинцев, Аргучинцева, 2007]. Кроме процессов адвективного и конвективного переноса и турбулентной диффузии, модель учитывает трансформацию малых газовых составляющих атмосферы.

Уравнения турбулентной диффузии примесей вместе с начальными и граничными условиями численно интегрировались в декартовой системе координат с применением метода фиктивных областей. При решении задачи использовался метод расщепления по физическим процессам. На каждом малом интервале времени рассматривается схема, состоящая из двух этапов. На первом этапе учитываются процессы переноса примесей по траекториям и турбулентной диффузии, а на втором – локальные преобразования и влияние источников. Аппроксимация задачи по времени на первом этапе построена с помощью двуциклического полного расщепления. На втором этапе при решении системы уравнений химической кинетики применена монотонная неявная схема первого порядка аппроксимации.

Проведена верификация модели, и получено удовлетворительное соответствие результатов численных расчетов и данных полевых измерений [Исследование распределения соединений ... , 1996].

Модель успешно применялась ранее при изучении процессов распространения и трансформации аэрозолей и газовых примесей в регионе Южного Байкала. Проводилось сравнение результатов численных расчетов концентраций диоксида серы, оксидов азота, сульфатов, нитратов, других газовых компонент и данных измерений в регионе оз. Байкал, получено их удовлетворительное соответствие [Макухин, Оболкин, Потемкин, 2014; Оценки пространственного распределения ... , 2016; Особенности пространственного распределения ... , 2014; Low-level atmospheric jets ... , 2014].

### Численные эксперименты

Первая серия численных расчетов проводилась с целью исследования влияния метеорологических условий на распространение твердых взвесей и, как следствие, на форму дымовых факелов от источников. Моделирование процессов распространения примесей проводилось в области площадью  $14 \times 10 \text{ км}^2$  и высотой 4 км над подстилающей поверхностью. Шаги по времени и пространству составляли соответственно 30 с и 100 м. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической теории турбулентности. Информация об интенсивности источников выбросов была взята из работы [Государственный доклад, 2013]. Источник выбросов твердых взвесей находился на высоте 180 м, его мощность составила 147 г/с.

На рисунке 1 приведен результат расчета распространения твердых взвесей в районе г. Усолья-Сибирского при сильной конвекции, когда из-за значительных скоростей подъема воздуха в термиках (струях и пузырях теплого воздуха) создаются условия для проникновения частиц примеси до нижней кромки облаков. Наблюдается волнообразная форма факела. Полученная карта-схема распределения загрязняющих веществ качественно и количественно согласуется с данными измерений [Берлянд, 1985]. Следует указать, что по данным 80 метеорологических станций Иркутской области в период 1951–2017 гг. в июне в среднем отмечалось 6 дней с развитием сильной конвекции и образованием гроз, в июле их число максимальное (8), в августе среднее число дней составляет 3.

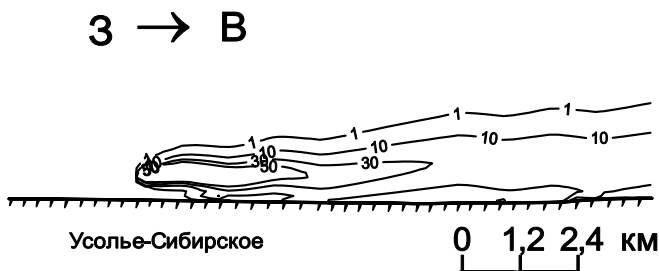


Рис. 1. Изолинии рассчитанных значений концентраций твердых взвесей (в  $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) при сильной конвекции. Масштаб по вертикали и горизонтали одинаков

Вторая серия численных экспериментов проводилась в области площадью  $200 \times 200 \text{ км}^2$  и высотой 4 км над поверхностью оз. Байкал. Рассматривались выбросы предприятий Усоля-Сибирского, Ангарска, Шелехова и Иркутска. Информация об интенсивности источников выбросов была взята из работы [Государственный доклад, 2013]. Шаги по времени и горизонтالي составляли соответственно 150 с и 1000 м, шаг по вертикали равнялся 100 м.

На рисунке 2 приведено распределение рассчитанных концентраций твердых взвесей на высотах 500, 1000 и 2000 м над акваторией Байкала при преобладающем в рассматриваемом регионе устойчивом северо-западном ветре. Такая метеорологическая ситуация наблюдается, например, при прохождении северо-западных циклонов. На высоте 500 м заметно влияние рельефа местности. На уровне 1 км влияние подстилающей поверхности значительно меньше, на высоте 2 км проявление рельефа практически незаметно. Выбросы предприятий Приангарья распространяются до предгорий Хамар-Дабана.

Выполнены оценки осаждения твердых взвесей на подстилающую поверхность рассматриваемого региона. Получено, что на площадь  $200 \times 200 \text{ км}^2$  осажается 95 % от выбросов частиц радиусом до 20 мкм. Таким образом, крупная фракция аэрозольных частиц осажается в пределах котловины озера и дождевым стоком попадает в воду, пополняя озерную взвесь [Chemical composition of ... , 1998].

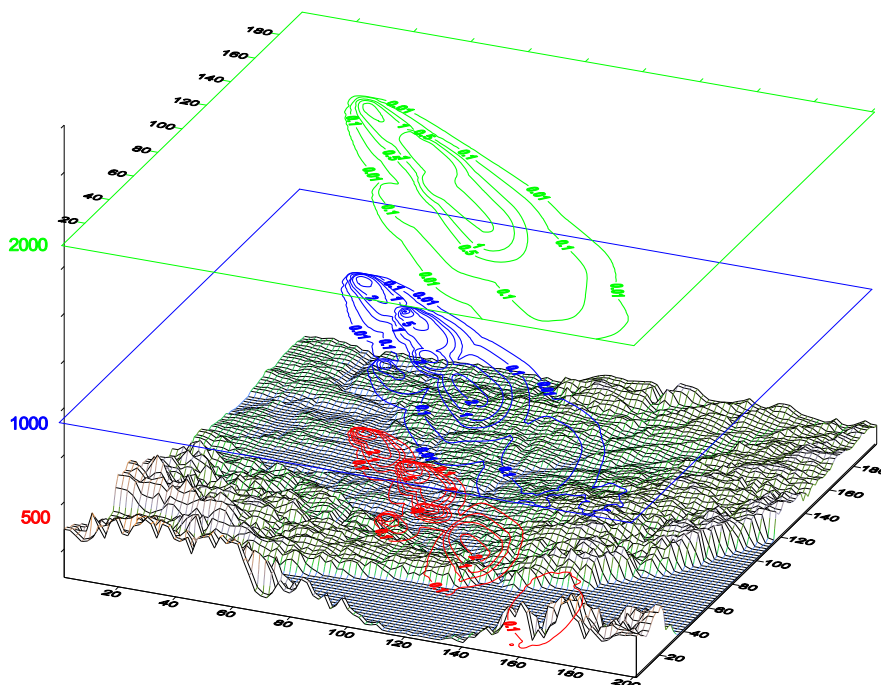


Рис. 2. Изолинии рассчитанных значений концентраций твердых взвесей (в  $\text{мг}/\text{м}^3$ ) над районом Прибайкалья при северо-западном ветре скоростью 3 м/с на высотах 500, 1000 и 2000 м над поверхностью озера

Следующая серия численных экспериментов использовалась для исследования влияния источников выбросов диоксидов серы и азота Иркутско-Черемховского, Нижнеселенгинского, Улан-Удэнского, Южно- и Северобайкальского промышленных узлов на загрязнение подстилающей поверхности Байкальской природной территории (БПТ). Моделирование процессов распространения и трансформации примесей проводилось в области площадью  $500 \times 500 \text{ км}^2$  и высотой 4 км над поверхностью оз. Байкал. Шаги по времени и горизонтали составляли соответственно 150 с и 1000 м, шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 350 м он равнялся 50 м, далее – 150, 500, 1000 и 2000 м. Начальная концентрация молекулярного азота  $\text{N}_2$  принималась равной  $0,93 \text{ кг/м}^3$ , молекулярного кислорода  $\text{O}_2$  – 0,297, водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$  –  $7 \cdot 10^{-4}$ , молекулярного водорода  $\text{H}_2$  –  $10^{-7}$ , озона  $\text{O}_3$  –  $6 \cdot 10^{-8}$  и диоксида азота  $\text{NO}_2$  –  $8 \cdot 10^{-10}$ . Блок химических реакций, учтывавшихся при численных экспериментах, представлен в работе [Аргучинцев, Аргучинцева, 2007]. В отличие от [Аргучинцев, Аргучинцева, 2007], расчеты проводились со значением константы скорости реакции  $R27$  (фотохимическая диссоциация диоксида азота), равным  $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

Сравнение рассчитанных по модели значений концентраций основных загрязнителей и других малых газовых составляющих атмосферы с данными измерений в различных регионах [Бримблкумб, 1988; Гершензон, Звенигородский, Розенштейн, 1990; MOAS: An Absorption ... , 1995; Dimitroulopoulos and Marsh, 1997; Imasu, Suda and Matsuno, 1995; Thompson, 1995] показало, что по порядку величины наблюдается их удовлетворительное соответствие.

На рисунках 3 и 4 представлены распределения интенсивностей осаждения сульфатов и нитратов на подстилающую поверхность БПТ в холодный период года. В долине Ангары изолинии имеют характерную вытянутость из-за преобладающих здесь направлений ветрового потока – северо-западного и юго-восточного. В долине Селенги в холодный период наиболее часты западные, юго-западные и восточные ветры, изолинии интенсивностей осаждения вытянуты соответствующим образом. Преобладающие ветровые потоки на северной оконечности Байкала – северо-западный и северо-восточный, примеси выносятся в основном на акваторию озера.

### Заключение

Оценен вклад предприятий Приангарья, Прибайкалья и Забайкалья в загрязнение оз. Байкал сульфатами и нитратами при атмосферных выбросах. Установлено, что наибольшее влияние на озеро оказывают выбросы предприятий Слюдянки и Байкальска, их вклад составляет 53 % сульфатов и 64 % нитратов. Значительно меньше влияние Иркутско-Черемховского промышленного комплекса – 18 и 25 % соответственно. Менее существенный вклад этого комплекса объясняется удаленностью источников выбросов от озера и наличием орографических неоднородностей, препятствующих переносу примесей. Вклад источников выбросов предприятий Забайкалья составляет 29 % по сульфатам и 21 % по нитратам. Вклад предприятий Северобайкальска незначителен.



*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания 0345-2016-0008 «Оценка и прогноз экологического состояния озера Байкал и сопряженных территорий в условиях антропогенного воздействия и изменения климата».*

### Список литературы

Акулов А. О. Влияние угольной промышленности на окружающую среду и перспективы развития по модели декаплинга // Регион: экономика и социология. 2014. № 1(81). С. 272–288.

Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2007. 255 с.

Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л. : Гидрометеопиздат, 1985. 272 с.

Бримблкунб П. Состав и химия атмосферы : пер. с англ. М. : Мир, 1988. 352 с.

Гершензон Ю. М., Звенигородский С. Г., Розенштейн В. Б. Химия радикалов ОН, НО<sub>2</sub> в земной атмосфере // Успехи химии. 1990. Т. 59, № 10. С. 1601–1626.

Голицын А. Н. Промышленная экология и мониторинг загрязнения окружающей среды. М. : Оникс, 2010. 336 с.

Дегодя Е. Ю., Мальцева Е. В. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду // Современ. проблемы транспорт. комплекса России. 2016. Т. 6, № 1. С. 34–37.

Исследование распределения соединений серы и азота в приземном слое оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, В. Л. Макухин, В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, Т. В. Ходжер // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 6. С. 748–754.

Макухин В. Л., Оболкин В. А., Потемкин В. Л. Экстремальные случаи переноса газовых примесей в атмосфере Прибайкалья в зимний период // Биосфера. 2014. Т. 6, № 4. С. 352–358.

О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2012 г. : гос. докл. Иркутск : Ин-т географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2013. 337 с.

Особенности пространственного распределения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов / В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин, Е. В. Чипанина, И. И. Мариняте // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 35–41.

Оценки пространственного распределения малых газовых примесей над акваторией озера Байкал в летний период с помощью полевых измерений и результатов математического моделирования / В. Л. Макухин, В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, И. В. Латышева, Т. В. Ходжер // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о земле. 2016. Т. 18. С. 69–80.

Федяева О. А. Промышленная экология. Конспект лекций. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2007. 145 с.

Chemical composition of suspension in water body of Lake Baikal / T. G. Potyomkina, A. M. Grachev, V. L. Potyomkin, V. B. Baryshev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1998. Vol. 405, N 2-3. P. 543–545.

Dimitroulopoulos C., Marsh A.R.W. Modelling studies of NO<sub>3</sub> nighttime chemistry and its effects on subsequent ozone formation // Atmospheric Environment. 1997. Vol. 31, N 18. P. 3041–3057.

Environmental regulation and industrial performance: An empirical analysis of manufacturing industry in China / R. R. Yang, R. Y. Long, T. Yue, Y. Y. Zhuang // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2014. Vol. 9, N 6. P. 768–777.

Imasu R., Suda A. and Matsuno T. Radiative Effects and Halocarbon Global Warming Potentials of Replacement Compounds for Chlorofluorocarbons // J. of the Meteorological Society of Japan. 1995. Vol. 73, N 6. P. 1123–1136.

Li X.-X., Britter R., Norford L. K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 144. P. 47–59.

Liang D., Fu K., Wang W. Modelling multi-component aerosol transport problems by the efficient splitting characteristic method // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 144. P. 297–314.

Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region / V. A. Obolkin, V. L. Potemkin, V. L. Makukhin, Ye. V. Chipanina, I. I. Marinayte // *International Journal of Environmental Studies*. 2014. Vol. 71, N 3. P. 391–397.

MOAS: An Absorption Laser Spectrometer for Sensitive and Loae Monitoring of Tropospheric OH and Other Trace Gases / W. Armerding, M. Spickermann, J. Walter, F. J. Gomes // *J. of Atmospheric Science*. 1995. Vol. 52, N 19. P. 3381–3392.

Strizhenok A. V., Ivanov A. V. Ecological Assessment of the Current State of Environmental Components on the Territory of the Impact of Cement Production Industry // *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18, N 6. P. 160–165.

Thompson A. M. Measuring and Modeling the Tropospheric Hydroxyl Radical (OH) // *J. of Atmospheric Science*. 1995. Vol. 52, N 19. P. 3315–3327.

Xie Z.-T., Hayden P., Wood C. R. Large-eddy simulation of approaching-flow stratification on dispersion over arrays of buildings // *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 71. P. 64–74.

## Peculiarities of Vertical Distribution of Aerosols and Gas Impurities in the Lake Baikal Region

V. L. Potemkin

*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk*

I. V. Latysheva

*Irkutsk State University, Irkutsk*

V. L. Makukhin

*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk*

*Irkutsk State University, Irkutsk*

T. G. Potemkina

*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk*

**Abstract.** With the help of a nonlinear nonstationary spatial Euler model, the processes of propagation and transformation of solid suspensions, sulfur compounds and nitrogen compounds in the Angara valley and above Baikal were investigated. Calculations were made to assess the impact of meteorological conditions on the dynamics of smoke plumes from anthropogenic sources. Strong convection of heated gases during ejection creates a large variety of aerosol cloud forms, which, when lifted, stratify, are drawn into the general wind flow and can be transported over long distances, covering the basin of Lake Baikal. Constructed maps of the distribution of pollutants near the surface of the earth and at altitude levels. Estimates of sedimentation of suspended solids on the underlying surface were made. It was found that 95 % of the coarse fraction particles (1–20  $\mu\text{m}$ ) are deposited on an area of 200×200  $\text{km}^2$ . The contributions of the enterprises of the Priangarie, the Baikal and Transbaikalia to the pollution of Lake Baikal by sulphates and nitrates through the atmospheric channel are calculated. The cities of



Slyudyanka and Baikalsk have the greatest influence (53 and 64 %, respectively). Less impact from Irkutsk and Chermkhovo (18 and 25 %). Transbaikalia enterprises make 29 and 21 % of the contribution. The obtained data can be used when conducting monitoring observations and making forecasts for the development of territories, taking into account local topography and climatic factors. The use of mathematical models of varying degrees of detail is promising and can simplify the preparation and conduct of fairly expensive and complex sampling of air, soil or snow when studying the effect of atmospheric emissions on the environment.

**Keywords:** Lake Baikal, the River Angara, solid suspensions, sulfate, nitrate, numerical model.

**For citation:** Potemkin V.L., Latsysheva I.V., Makukhin V.L., Potemkina T.G. Peculiarities of Vertical Distribution of Aerosols and Gas Impurities in the Lake Baikal Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2019, vol. 27, pp. 111-121. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.111> (in Russian)

### References

Akulov A.O. *Vliyaniye ugol'noy promyshlennosti na okruzhayushchuyu sredu i perspektivy razvitiya po modeli dekaplinga* [The influence of the coal industry on the environment and development prospects on the decoupling model]. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 2014, vol. 1(81), pp. 272-288. (in Russian)

Arguchintsev V.K., Arguchintseva A.V. *Modelirovaniye mezomasshtabnykh gidrotermodynamicheskikh protsessov i perenos antropogennykh primesey v atmosfere i gidrosfere regiona oz. Baykal* [Modeling of mesoscale hydrothermodynamic processes and the transfer of anthropogenic impurities in the atmosphere and hydrosphere of the Lake region. Baikal]. Irkutsk, IGU Publ., 2007, 255 p. (in Russian)

Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Forecast and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 272 pp. (in Russian)

Brimblkumb P. *Sostav i khimiya atmosfery* [Composition and chemistry of the atmosphere], Trans. with English. Moscow, Mir Publ., 1988, 352 p.

Gershenzon Yu.M., Zvenigorodskiy S.G., Rozenshteyn V.B. *Khimiya radikalov ON, NO<sub>2</sub> v zemnoy atmosfere* [Chemistry of OH radicals, NO<sub>2</sub> in the Earth's atmosphere]. *Uspekhi khimii* [Advances in Chemistry], 1990, vol. 59, no. 10, pp. 1601-1626. (in Russian)

Golitsyn A.N. *Promyshlennaya ekologiya i monitoring zagryazneniya okruzhayushchey sredy* [Industrial ecology and monitoring of environmental pollution]. Moscow, Onyx Publ., 2010, 336 p. (in Russian).

Degodya Ye.Yu., Mal'tseva Ye.V. *Vliyaniye avtomobil'nogo transporta na okruzhayushchuyu sredu* [Influence of motor transport on the environment]. *Sovremennyye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of the transport complex in Russia], 2016, vol. 6, no. 1, pp. 34-37.

Arguchintsev V.K., Makukhin V.L., Obolkin V.A., Potemkin V.L., Khodzher T.V. *Issledovaniye raspredeleniya soyedineniy sery i azota v privodnom sloye ozera Baykal* [Investigation of the distribution of sulfur and nitrogen compounds in the drive layer of the lake Baikal]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and oceanic optics], 1996, vol. 9, no. 6, pp. 748-754. (in Russian)

Makukhin V.L., Obolkin V.A., Potemkin V.L. *Ekstremal'nyye sluchai perenos gazovykh primesey v atmosfere Pribaykal'ya v zimniy period* [Extreme cases of the transport of gas impurities in the Baikal atmosphere in the winter]. *Biosfera* [Biosphere], 2014, vol. 6, no. 4, pp. 352-358. (in Russian)

*Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2012»* [State report «On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2012»]. Irkutsk, Institute of Geography im. V. B. Sochavy SO RAS Publ., 2013, 337 p. (in Russian)

Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina Ye.V., Marinayte I.I. *Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya dioksida sery v Pribaykal'ye po dannym marshrutnykh izmereniy i chislennykh eksperimentov* [Peculiarities of the spatial distribution of sulfur dioxide

in the Baikal region from routing measurements and numerical experiments]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2014, no. 12, pp. 35-41. (in Russian)

Makukhin V.L., Obolkin V.A., Potemkin V.L., Latysheva I.V., Khodzher T.V. *Otsenki prostranstvennogo raspredeleniya malykh gazovykh primesey nad akvatoriyey ozera Baykal v letniy period s pomoshch'yu polevykh izmereniy i rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya* [Estimates of the spatial distribution of small gas impurities over the water area of Lake Baikal in summer with the help of field measurements and results of mathematical modeling]. *Izvestiya IGU. Seriya «Nauki o zemle»* [Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2016, vol. 18, pp.69-80. (in Russian)

Fedyayeva O.A. *Promyshlennaya ekologiya* [Industrial ecology]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2007, 145 p. (in Russian)

Potyomkina T.G., Grachev A.M., Potyomkin V.L., Baryshev V.B. Chemical composition of suspension in water body of Lake Baikal. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1998, vol. 405, no. 2-3, pp. 543-545.

Dimitroulopoulos C., Marsh A.R.W. Modelling studies of NO<sub>3</sub> nighttime chemistry and its effects on subsequent ozone formation. *Atmos. Environ*, 1997, vol. 31, no. 18, pp. 3041-3057.

Yang R.R., Long R.Y., Yue T., Zhuang Y.Y. Environmental regulation and industrial performance: An empirical analysis of manufacturing industry in China. *Int. J. Sustain. Dev. Plann.*, 2014, vol. 9, no. 6, pp. 768-777.

Imasu R., Suda A., Matsuno T. Radiative Effects and Halocarbon Global Warming Potentials of Replacement Compounds for Chlorofluorocarbons. *J. of the Meteorol. Soc. of Japan*, 1995, vol. 73, no. 6, pp. 1123-1136.

Li X.-X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation. *Atmos. Environ*, 2016, vol. 144, pp. 47-59.

Liang D., Fu K., Wang W. Modelling multi-component aerosol transport problems by the efficient splitting characteristic method. *Atmos. Environ*, 2016, vol. 144, pp. 297-314.

Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina Ye.V., Marinayte I.I. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region. *Intern. J. of Environ. Studies*, 2014, vol. 71, no. 3, pp. 391-397.

Armerding W., Spickermann M., Walter J. and Gomes F.J. MOAS: An Absorption Laser Spectrometer for Sensitive and Loae Monitoring of Tropospheric OH and Other Trace Gases. *J. of Atmos. Sci.*, 1995, vol. 52, no. 19, pp. 3381-3392.

Strizhenok A.V., Ivanov A.V.. Ecological Assessment of the Current State of Environmental Components on the Territory of the Impact of Cement Production Industry. *J. of Ecol. Engineering*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 160-165.

Thompson A.M. Measuring and Modeling the Tropospheric Hydroxyl Radical (OH). *J. of Atmos. Sci.*, 1995, vol. 52, no. 19, pp. 3315-3327.

Xie Z.-T., Hayden P., Wood C.R. Large-eddy simulation of approaching-flow stratification on dispersion over arrays of buildings. *Atmos. Environ.*, 2013, vol. 71, pp. 64-74.

**Потемкин Владимир Львович**

кандидат географических наук  
старший научный сотрудник  
Лимнологический институт СО РАН  
Россия, 664003, г. Иркутск,  
ул. Улан-Баторская, 3  
тел.: (3952) 42-65-02  
e-mail: klimat@lin.irk.ru

**Potemkin Vladimir Lvovich**

Candidate of Sciences (Geography),  
Senior Researcher  
Limnological Institute SB RAS  
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
tel.: (3952) 42-65-02  
e-mail: klimat@lin.irk.ru

**Латышева Инна Валентиновна**

кандидат географических наук, доцент

**Latysheva Inna Valentinovna**

Candidate of Sciences (Geography),

*Иркутский государственный университет*  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-10-94  
e-mail: ababab1967@mail.ru

*Associate Professor*  
*Irkutsk State University*  
1, K. Marks st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
tel.: (3952) 52-10-94  
e-mail: ababab1967@mail.ru

**Макухин Владимир Леонидович**  
кандидат технических наук, доцент  
*Иркутский государственный университет*  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-10-94  
*Лимнологический институт СО РАН*  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. Улан-  
Баторская, 3  
тел.: (3952) 42-65-02  
e-mail: aerosol@lin.irk.ru

**Makukhin Vladimir Leonidovich**  
*Candidate of Sciences (Technical),*  
*Associate Professor*  
*Irkutsk State University*  
1, K. Marks St., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
tel.: (3952) 52-10-94  
*Limnological Institute SB RAS*  
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
tel.: (3952) 42-65-02  
e-mail: aerosol@lin.irk.ru

**Потемкина Татьяна Гавриловна**  
кандидат географических наук  
старший научный сотрудник  
*Лимнологический институт СО РАН*  
Россия, 664003, г. Иркутск,  
ул. Улан-Баторская, 3  
тел.: (3952) 42-65-02  
e-mail: tat\_pot@lin.irk.ru

**Potemkina Tatjana Gavrilovna**  
*Candidate of Sciences (Geography),*  
*Senior Researcher*  
*Limnological Institute SB RAS*  
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
tel.: (3952) 42-65-02  
e-mail: tat\_pot@lin.irk.ru