

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ГОРОДСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ГОРНОЙ КОТЛОВИНЕ (НА ПРИМЕРЕ Г. ЧИТЫ)

Э. А. Пьянова¹, Л. М. Фалейчик^{2,3}, А. А. Фалейчик³

¹ *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

² *Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, Чита*

³ *Забайкальский государственный университет, 672039, Чита*

УДК 502.3+519.6

Данная работа является частью исследований, направленных на изучение процессов загрязнения воздушных бассейнов городских агломераций, расположенных в горных котловинах, выявление городских территорий с высоким риском загрязнения атмосферного воздуха. На основе разрабатываемой в ИВМиМГ СО РАН мезомасштабной модели динамики атмосферы и переноса примеси в областях со сложным рельефом, адаптированной к условиям Читино-Ингодинской котловины в Забайкалье, выполнен численный эксперимент, описывающий один из вариантов развития метеорологической ситуации в регионе. Сценарное моделирование проводится с целью изучения влияния рельефа котловины на формирование локальных циркуляций, мощность и локализацию температурных инверсий в зимний период. На основе тестовых расчетов исследуется влияние различных проявлений зимнего мезоклимата в котловине на распространение загрязняющих примесей, поступающих с атмосферными выбросами предприятий теплоэнергетики г. Читы. Пространственный анализ результатов сценарных расчетов выполнен с использованием геоинформационных технологий. Результаты исследований могут быть использованы для оценок последствий процессов реиндустриализации экономики Забайкалья.

Ключевые слова: динамика атмосферы, качество воздуха, математическое моделирование атмосферных процессов, антропогенное воздействие, геоинформационные системы (ГИС).

Введение

Процессы реиндустриализации экономики России носят крайне неоднородный характер. Забайкалье не относится к числу лидеров экономического развития среди сибирских регионов. Поэтому так актуальны и важны количественные оценки последствий хозяйственной деятельности человека во всех сферах, в частности, при оценке качества атмосферного воздуха в крупных городах. На основе таких исследований появляется возможность более аргументированно с экономической точки зрения обосновывать решения по внедрению новых технологий, по переходу энергетических предприятий города на новые виды топлива.

Основной причиной низкого качества городского воздуха являются большие объемы загрязняющих выбросов от промышленных предприятий, автотранспорта и других источников-загрязнителей. Важно отметить, что качество воздуха также существенно зависит от погодных условий: формирование неблагоприятных метеоусловий способствует накоплению вредных примесей, даже когда промышленные предприятия снижают мощность выбросов. Примерами таких неблагоприятных метеорологических факторов являются безветренная погода, приземные и приподнятые температурные инверсии, формирующиеся в городских агломерациях и их окрестностях. Для изучения взаимосвязей между погодными процессами и качеством

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 17-01-00137, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П, проекта П.2П/I.3-3 фундаментальных исследований СО РАН. Адаптация авторской модели для условий Забайкальского края выполнена в рамках гранта РГНФ, проект № 16-02-00102а. Расчеты выполнены с использованием ресурсов ЦКП Сибирский Суперкомпьютерный Центр ИВМиМГ СО РАН

атмосферы в городских агломерациях широко применяются методы численного моделирования [1–4 и др.], позволяющие на основе численного эксперимента провести анализ различных сценариев развития метеоситуаций, спрогнозировать и оценить на его основе риски превышений предельно допустимых концентраций загрязнений при различных метеорологических условиях.

Настоящая работа является продолжением цикла работ авторов, посвященных проблемам загрязнения воздушного бассейна сибирских городов [5, 6]. Важная, общая черта мезоклимата городов сибирского региона, особенно Забайкалья, — формирование температурных инверсий (приземных, приподнятых) в зимний период, когда территория Сибири подвержена воздействию Азиатского антициклона. Инверсионное распределение температуры затрудняет вертикальное перемешивание слоев воздуха, что приводит к застойным явлениям в атмосфере. При этом многие населенные пункты располагаются в горных долинах, в то время как низкие формы рельефа дополнительно способствуют формированию инверсионных условий. Ярким примером населенных пунктов, где сочетаются все перечисленные неблагоприятные факторы, обуславливающие низкое качество атмосферного воздуха в городе, особенно в зимний период, является город Чита.

1 Методология

Для моделирования развития атмосферных циркуляций и процессов распространения примесей в Читинско-Ингодинской впадине мы использовали мезомасштабную негидростатическую модель динамики атмосферы и переноса примеси в областях со сложным рельефом, разрабатываемую в ИВМиМГ СО РАН с непосредственным участием авторов. Основными уравнениями модели являются три уравнения движения для нахождения компонент вектора скорости ветра, уравнения переноса тепла и влаги, уравнение неразрывности. Уравнения модели записаны в отклонениях, а значения полей метеозадающих элементов представляются в виде суммы фоновых крупномасштабных значений и отклонений от фона. Это связано с тем, что циркуляцию земной атмосферы в большей мере формируют два периодических процесса — годовое обращение планеты вокруг Солнца и суточное вращение Земли. В связи с этим мы можем выделить крупномасштабные атмосферные процессы и циркуляции локального характера, связанные с суточным ходом. Отклонения отражают эволюцию метеорологических полей, вызванную факторами локального характера, прежде всего рельефом местности и неоднородностями температуры подстилающей поверхности. В наших исследованиях предполагалось, что крупномасштабные поля метеозадающих элементов известны и заданы.

В модели также рассчитывается температура подстилающей поверхности, при этом учитывается неоднородность потоков прямой солнечной радиации, поступающих на участки поверхности различного уклона и экспозиции. Для задания граничных условий на нижней расчетной границе используется параметризационная модель приземного слоя [7]. Горизонтальные коэффициенты турбулентной диффузии рассчитываются по модели Смагоринского, а вертикальный коэффициент по k - ϵ модели, где k — кинетическая энергия турбулентности, ϵ — энергия диссипации. Для описания переноса пассивной примеси используется конвективно-диффузионное уравнение с начальными и граничными условиями.

Численные схемы для реализации модели построены на базе вариационных принципов с использованием сопряженных задач [2]. Вариационный подход обеспечивает энергетическую сбалансированность разностных схем, а также точный учет естественных краевых условий на границах области моделирования. Это особенно важно на нижней границе воздушных масс в условиях сложной орографии подстилающей поверхности. Для учета рельефа территории используются идеи метода "фиктивных" областей [8]. При численной реализации модели применялись методы расщепления. Конвективно-диффузионные операторы аппроксимированы монотонными транспортными разностными схемами [9]. Описание модели динамики атмосферы и переноса примеси и используемых методов численной реализации можно найти в работах [2, 10, 11].

При изучении процессов формирования неблагоприятных метеорологических ситуаций в районе г. Читы мы использовали сценарный подход, суть которого заключается в том, чтобы описать мезоклимат исследуемой территории набором сценариев. Результаты расчетов по этим сценариям будут отражать особенности развития метеорологических ситуаций, типичных для исследуемых регионов. На основе сценарного моделирования можно рассчитать и экстремальные ситуации состояния атмосферы и процессов рассеяния загрязняющих примесей.

Для проведения численных исследований модель адаптировалась к орографии и другим характеристикам подстилающей поверхности выбранной территории. В нашей работе данные о высотах рельефа в узлах расчетной сетки получены с использованием ГИС-технологий [12] из находящихся в свободном доступе данных интерферометрической съемки земного шара — Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). В работе были использованы данные SRTM 4 с разрешением 3 угловых секунды (≈ 90 м) [13].

Для настройки модели к климатическим условиям региона необходимо задать распределение крупномасштабных полей метеозадающих элементов. При прогнозных расчетах значения крупномасштабных фоновых полей обычно получают по глобальным моделям циркуляции атмосферы. В наших исследованиях для расчета сценариев мы предлагаем задавать различные варианты распределения метеополей, опирающиеся на значения климатических норм для соответствующих полей метеозадающих элементов в каждом из периодов года. И уже с таким набором параметров и распределений фоновых полей решать задачу на установление квазипериодического режима, отражающего суточное поведение полей метеозадающих элементов над выбранной территорией. Практически проверено, что для выхода на квазипериодический режим достаточно 2–3 суток модельного времени.

Таким образом, проводя серии сценарных расчетов для каждого времени года, мы получаем и накапливаем данные о характере распределения полей метеозадающих элементов, описывающие особенности развития атмосферных циркуляций для региона. В дальнейшем эти данные можно использовать в качестве начальных условий при реализации более сложных сценариев развития метеоситуаций.

2 Результаты

По мезомасштабной модели динамики атмосферы и переноса примеси, адаптированной к условиям Забайкальского края, был проведен численный расчет для зимних условий, описывающий один из вариантов формирования локальных циркуляций и рассеивания загрязняющих примесей в районе г. Читы.

Для моделирования атмосферных циркуляций была выбрана область $100 \times 100 \text{ км}^2$ (рис. 1). По вертикали расчеты велись до высоты 4.2 км. В центре области выделен город. Он находится в котловине — Читино-Ингодинской впадине, которая расположена между Яблоновым хребтом и хребтом Черского.

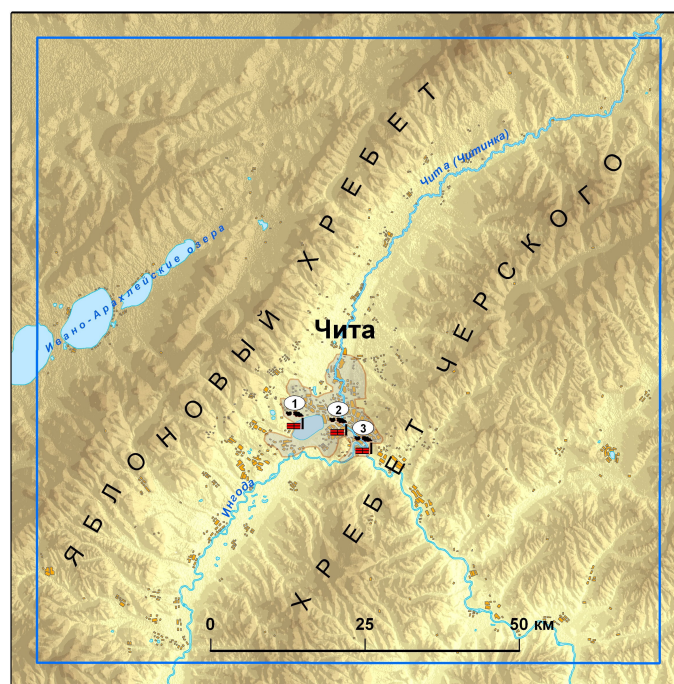


Рис. 1: Область моделирования

Численные расчеты проводились на сетке $200 \times 200 \times 50$ узлов с шагами $\Delta x = \Delta y = 500 \text{ м}$ по горизонтали, по вертикали шаг был неравномерный:

$$\Delta z_k = \begin{cases} 30, & k = 1, \dots, 20, \\ 50, & k = 21, \dots, 30, \\ 100, & k = 31, \dots, 35, \\ 150, & k = 36, \dots, 40, \\ 200, & k = 41, \dots, 50. \end{cases}$$

Фоновое распределение температуры по вертикали задавалось по формуле $T(z) = T_0 - \gamma z$, где T_0 — температура атмосферы на уровне нижней точки поверхности, γ — вертикальный градиент температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$). Температура поверхности в начальный момент времени полагалась равной $T_0 = -25^{\circ}\text{C}$. Стратификация атмосферы задавалась устойчивой, до высоты 800 м параметр $\gamma = 0.0028^{\circ}\text{C}/\text{м}$, выше $\gamma = 0.0045^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Для городской застройки, замерзших водоемов и остальной территории учитывались различия соответствующих значений альбедо поверхностей и других параметров модели. В эксперименте предполагалось, что развитие циркуляций происходит только под действием температурной неоднородности подстилающей поверхности. Фоновый набегающий поток отсутствует.

На рисунках 2, 3 представлены вертикальные разрезы поля температуры через середину области моделирования. Видно, что и в дневное, и в ночное время подстилающая поверхность холоднее, чем слой воздуха, располагающийся над ней, то есть в долине формируется приземная инверсия. При таких условиях вертикальное перемешивание в нижнем слое затруднено. Это способствует накоплению загрязняющих примесей от источников выбросов, располагающихся внутри инверсионного слоя. Выше инверсионного слоя рассеивание происходит активнее. На рис. 3 можно видеть, что в ночное время в численном эксперименте наблюдалось формирование и приподнятой инверсии. В этом случае негативное влияние на атмосферу города оказывают источники выбросов, расположенные под нижней кромкой инверсии, поскольку рассеивание примесей будет происходить в атмосфере ниже приподнятого инверсионного слоя. Формирование таких неблагоприятных метеорологических условий в зимнее время характерно практически для всей территории Сибири [14]. Исследование влияния инверсионных условий на качество атмосферы в городах России можно найти в работах [15, 16] и др.

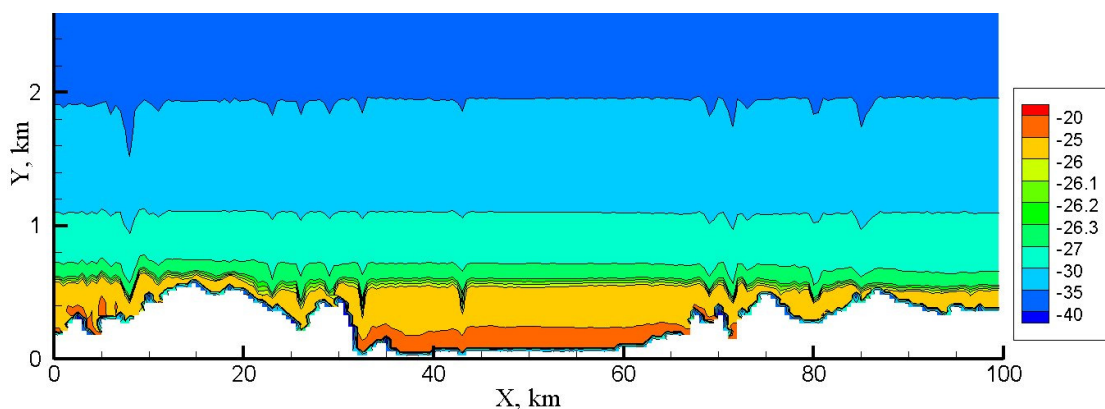


Рис. 2: Вертикальный разрез поля температуры ($^{\circ}\text{C}$), 14 ч местного времени

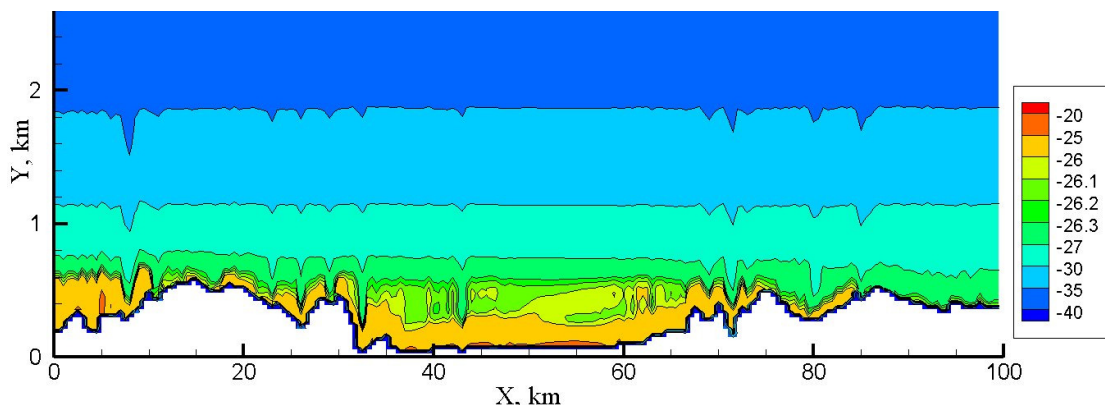


Рис. 3: Вертикальный разрез поля температуры ($^{\circ}\text{C}$), 24 ч местного времени

В рамках описанного зимнего сценария на фоне смоделированной метеорологической ситуации мы рассмотрели процесс переноса пассивных невесомых примесей от трех точечных источников. Местоположение модельных источников на расчетной сетке было задано максимально близко к локализации промышленных

труб двух ТЭЦ и котельной города Читы. Источник № 1 имитирует трубу высотой 120 м над поверхностью земли, источники № 2 и № 3 соответствуют трубам высотой 90 м. В численном эксперименте мощность каждого источника задавалась равной 1 условной единице в секунду. Предполагалось, что в начальный момент во всей области концентрации примесей нулевые.

На рисунке 4 представлены изолинии концентраций пассивных примесей на высоте 30 м над поверхностью в дневное (рис. 4, а) и в ночное (рис. 4, б) время. Видно, что от источника № 1 загрязнение преимущественно переносится на юг и юго-запад по долине, а от двух других источников примеси рассеиваются в юго-восточном направлении.

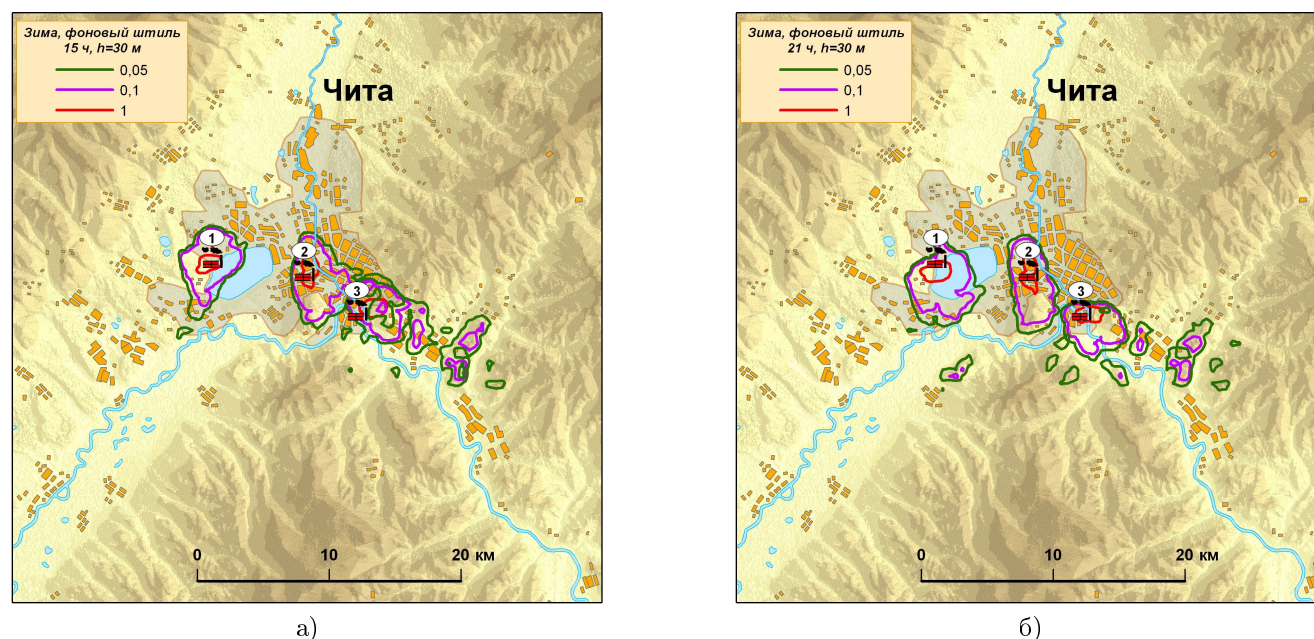


Рис. 4: Изолинии концентраций пассивных примесей (усл. ед.) на высоте 30 м над поверхностью: а) 15 ч и б) 21 ч местного времени

На высоте 120 м над поверхностью направление переноса сохраняется (рис. 5). На этой высоте концентрации выше, поскольку источники высокие, и рассеивание происходит в основном выше слоя приземной инверсии.

Можно отметить, что в условиях рассмотренного зимнего сценария менее всего на качество атмосферы города Читы влияют выбросы от источника № 1. В то время как выбросы от источников № 2 и № 3 рассеиваются в атмосфере юго-восточной части города.

Заключение

На основе численной модели динамики атмосферы и комплекса программ выполнен сценарный расчет, описывающий один из вариантов развития атмосферных циркуляций и распространения пассивных примесей в районе г. Читы в зимний период. Модель адекватно описывает процессы формирования приземных и приподнятых инверсий в Читино-Ингодинской впадине. Несмотря на отсутствие фонового набегающего потока, изолинии концентраций имеют достаточно сложный характер, обусловленный влиянием рельефа и температурных неоднородностей подстилающей поверхности. Таким образом, можно констатировать, что местные локальные атмосферные циркуляции оказывают существенное влияние на перераспределение примесей над территорией города.

Используемая модель и сценарный подход позволяют изучать закономерности формирования полей концентрации примесей как от действующих, так и от потенциально возможных источников в регионе. При этом отметим, что модельные сценарии распространения пассивных примесей подходят для описания рассеивания химически неактивных веществ. Для моделирования атмосферного переноса химически активных веществ необходимо использовать более сложные уравнения, учитывающие химическую трансформацию примесей. Использование условных единиц в расчетах концентраций загрязнений позволяет, зная мощности

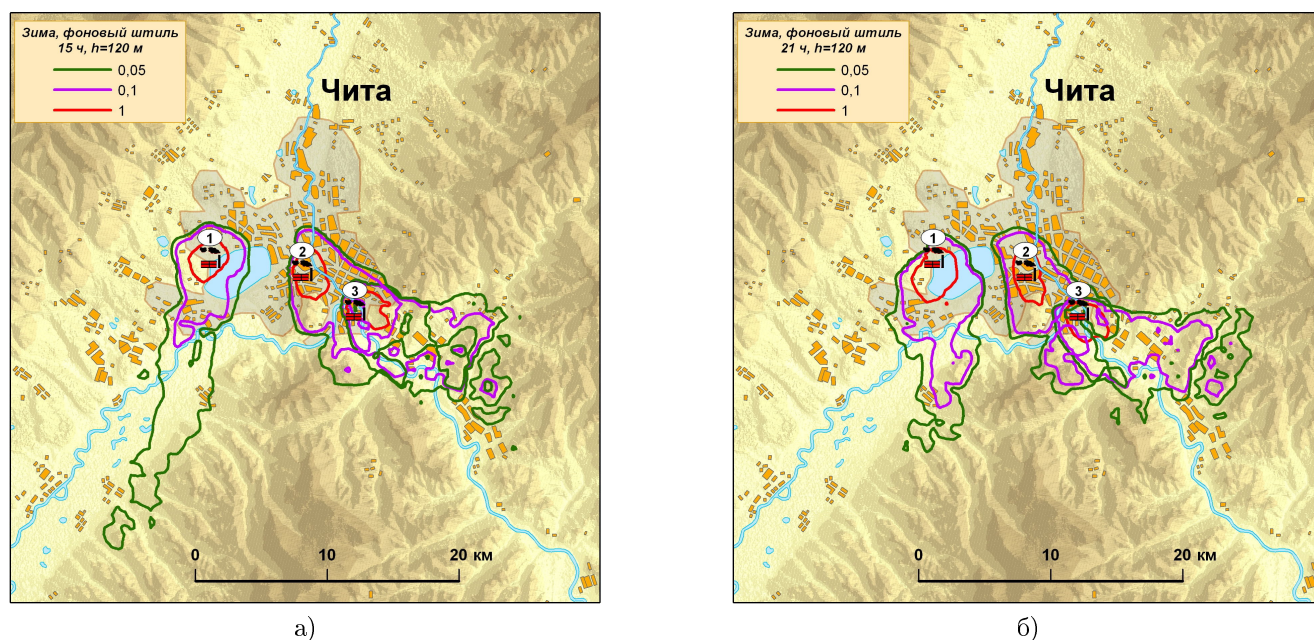


Рис. 5: Изолинии концентраций пассивных примесей (усл. ед.) на высоте 120 м над поверхностью: а) 15 ч и б) 21 ч местного времени

выбросов каждого вида примесей для каждого из источников, достаточно просто получить оценочные значения концентраций и в натуральных единицах. Для представленного численного эксперимента чем ближе реальные изучаемые примеси по своим характеристикам будут соответствовать невесомой пассивной примеси, тем точнее будут эти оценки. Более того, это позволит, не прибегая к повторному проведению расчетов с новыми данными о мощности выбросов, получить предварительные оценки изменения качества воздушной среды территории в результате перехода предприятий на новые технологии и новые виды топлива.

Дальнейшие исследования предполагают моделирование сценариев развития локальных атмосферных циркуляций при других вариантах задания фоновых климатических полей, учет фоновых набегающих потоков различного направления, проведение численных расчетов для изучения распространения как невесомых, так и “тяжелых” примесей.

Список литературы

- [1] Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
- [2] Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
- [3] Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models / Editors Baklanov A., Makhura A., Sokhi R. Springer, 2011.
- [4] Барт А.А., Старченко А.В., Фазлиев А.З. Информационно-вычислительная система для краткосрочного прогноза качества воздуха над территорией г. Томска // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 7. С. 594–601.
- [5] Pyanova E.A., Penenko V.V. and Faleychik L.M. Scenario studies of local atmospheric circulations in the Krasnoyarsk region // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356D (November 29, 2016); doi:10.1117/12.2249043.
- [6] Pyanova E.A., Penenko V.V. and Faleychik L.M. Численное исследование процессов атмосферного переноса примеси над территорией городской агломерации в условиях сложной орографии // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2017. Т. 4. № 1. С. 82–87.

- [7] 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.
- [8] Алоян А.Е., Фалейчик А.А., Фалейчик Л.М. Алгоритм численного решения метеорологических задач в случае криволинейной области // Математические модели рационального природопользования. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1989. С. 14–35.
- [9] Penenko V., Tsvetova E. Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // J. of Computation and Applied Mathematics. 2009. V. 226, iss. 1. P. 319–330.
- [10] 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.
- [11] Пьянова Э.А. Исследование трансформации воздушного потока над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10. № S3. С. 106–111.
- [12] Фалейчик Л.М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2012. Т. 10. № 2. С. 14–24.
- [13] Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). 2008, available from <http://srtm.csi.cgiar.org>
- [14] Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие / Под ред. Э.Ю. Безуглой, М.Е. Берлянда. Ленинград: Гидрометеониздат, 1983. 328 с.
- [15] Битехтина М.А., Михайлюта С.В., Леженин А.А., Тасейко О.В. Эволюция пограничного слоя и особенности загрязнения атмосферы города // Вестник Кемеровского государственного университета. 2012. Т. 4. № 2. С. 143–148.
- [16] Ячмёнова Н.В., Гольвей А.Ю. Повторяемость инверсий и их влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске // Вестник Челябинского государственного университета. 2011. № 5. С. 84–89.

Эльза Андреевна Пьянова — к.ф.-м.н., науч.сотр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: pyanova@mtmgr.sgcc.ru;

Лариса Михайловна Фалейчик — к.т.н., ст.науч.сотр. Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН;
доцент Забайкальского государственного университета;
e-mail: lfaleychik@bk.ru;

Андрей Анатольевич Фалейчик — к.ф.-м.н., доцент Забайкальского государственного университета;
e-mail: faa55@bk.ru.

Дата поступления — 13 июля 2017 г.