

УДК 502.3:504.61

DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-12-41-50

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РЕИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА

USE OF MATHEMATICAL MODELING FOR ESTIMATION OF ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF THE REGIONAL ECONOMY REINDUSTRIALIZATION



Э. А. Пьянова,
*Институт вычислительной
математики и
математической геофизики
Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Новосибирск
pianova@ngs.ru*

E. Pyanova,
*Institute of Computational
Mathematics and Mathematical
Geophysics, Russian Academy
of Sciences, Siberian Branch,
Novosibirsk*



А. А. Фалейчик,
*Забайкальский
государственный
университет, г. Чита
faa55@bk.ru*

A. Faleychik,
*Transbaikal State University,
Chita*



Л. М. Фалейчик,
*Институт природных
ресурсов, экологии и
криологии Сибирского
отделения Российской академии
наук, г. Чита; Забайкальский
государственный университет,
г. Чита
lfaleychik@bk.ru*

L. Faleychik,
*Institute of Natural Resources,
Ecology and Cryology, Russian
Academy of Sciences, Siberian
Branch, Chita; Transbaikal State
University, Chita*

Проведено исследование формирования атмосферных циркуляций и процессов распространения загрязняющих примесей в Читино-Ингодинской котловине в условиях сложной орографии. Рассмотрены особенности формирования гидрометеорологического режима атмосферы, важные с точки зрения опасности возникновения высоких уровней загрязнения воздушного бассейна города Читы. Разработаны сценарии возможного развития локальных атмосферных циркуляций в зимний и летний периоды. В зимнем сценарии моделируются процессы распределения загрязняющих выбросов от трех высотных источников в отсутствие фонового ветра. Летние сценарии моделируют процессы распространения дымовых шлейфов от одиночного очага лесного пожара в окрестностях города Читы. Представлены результаты сценарных расчетов, выполненных на основе мезомасштабной негидростатической модели динамики атмосферы и переноса примеси в областях со сложным рельефом. Воспроизведены особенности развития атмосферных циркуляций над территорией в разных условиях. Показано, что климатические особенности и характеристики подстилающей поверхности существенно влияют на характер локальных циркуляций и на перераспределение атмосферных загрязнений над территорией города. Отмечено, что особую актуальность исследования в этой области приобретают в условиях происходящих процессов реиндустриализации экономики региона, в частности при переходе предприятий на новые технологии и новые виды топлива

Ключевые слова: экономическое развитие региона; оценка антропогенного воздействия; загрязнение атмосферы; математическое моделирование; географические информационные системы; геоинформационные технологии; реиндустриализация

The atmospheric circulation generation and the pollutants transport processes in the Chitino-Ingodinsky basin under complex orography conditions are studied. The orographic and climate features of the hydrometeorological regime formation of the atmosphere are important factors to creation of the pollution high levels in the Chita city air basin. The authors have created scenarios of possible development of local atmospheric circulations during the winter and summer periods. The simulation on the winter scenarios was supposed that the background wind was absent. Summer scenarios simulate the atmospheric transport of smoke from a forest fire in the Chita neighborhood. The results of scenario calculations which have been performed on the basis of a numerical model of atmospheric dynamics and impurity transport are presented. It was noted that the research in this field have a special significance in the context of ongoing processes of reindustrialization of the region's economy, in particular, when businesses switch to new technologies and new fuel

Key words: economic development of region; anthropogenic impact assessment; air pollution; math modeling; geographical information systems; geoinformation technologies; reindustrialization

Введение. Процессы реиндустриализации экономики России носят крайне неоднородный характер. Забайкалье не относится к числу лидеров экономического развития среди сибирских регионов. Тем не менее, данные процессы неизбежно набирают обороты, в связи с чем проблема экологической оценки результатов хозяйственной деятельности человека для всех природных сред, в частности для атмосферного воздуха в крупных городах, по-прежнему является актуальной. Рациональнее заранее тщательно проанализировать возможные неблагоприятные последствия тех или иных вариантов принимаемых решений, нежели впоследствии тратить ресурсы на исправление ошибок. Зачастую результаты неправильных решений имеют необратимый характер. В крупных городах, особенно Сибирского региона, таких примеров достаточно много.

Наиболее распространенными причинами 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. Примерами неблагоприятных метеорологических факторов являются безветренная погода, инверсионные условия, неблагоприятные направления ветра, способствующие переносу загрязнителей от источников к жилым территориям, и др. Безусловно, эти и другие факторы учитываются в ходе планирования

развития городов, однако существующие методики оценки их влияния не всегда точны. Например, в основе используемых методик расчета уровней загрязнения атмосферы городов лежат данные розы ветров, получаемые в результате статистической обработки наблюдений стационарных метеостанций. В то же время сложная топография территории, климатические и другие особенности региона могут существенно трансформировать ветровые потоки. Следовательно, такая локальная трансформация ветровых потоков приведет к более сложному распределению загрязняющих выбросов внутри городской агломерации. Роза ветров, получаемая на основе информации с фоновой метеорологической станции, обычно располагающейся на окраине города, может не совпадать с розой ветров для отдельных районов городской застройки [6; 16]. Это может быть обусловлено не только влиянием сложной топографии территории, но и фактически имеющейся городской застройкой.

Для изучения взаимосвязей между погодными процессами, антропогенным вмешательством и качеством атмосферы в городских агломерациях широко применяются методы численного моделирования [2; 5; 7–9; 14; 19], 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.

Численное моделирование может выступать инструментом для получения оценок вклада различных источников в загрязнение городской атмосферы, при этом источники могут быть как природными, так и антропогенными.

В настоящей работе представлена технология проведения сценарных оценок качества атмосферы в областях со сложным рельефом, которая использовалась при исследованиях процессов переноса примесей в атмосфере г. Чита.

Методология проведения сценарных оценок и используемые данные. При изучении процессов формирования неблагоприятных метеорологических ситуаций в районе г. Чита 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 проанализировать и варианты состояния атмосферы, приводящие к экстремально высоким уровням ее загрязнения.

При моделировании мы выделяем крупномасштабные атмосферные процессы, в большей мере связанные с годовым вращением Земли вокруг Солнца, и циркуляции локального характера, связанные с суточным вращением вокруг своей оси. Крупномасштабные поля метеоэлементов мы считаем известными и задаем их распределение на основе данных климатических справочников и результатов расчетов с помощью крупномасштабных моделей. Суточные изменения атмосферных характеристик мы рассматриваем как отклонения значений метеополей от их фоновых крупномасштабных значений. Отклонения отражают эволюцию метеорологических полей, вызванную факторами локального характера, прежде всего, рельефом местности и неоднородностями температуры подстилающей поверхности.

Для моделирования развития атмосферных циркуляций и процессов распространения примесей в Читино-Ингодинской

впадине, в которой расположен г. Чита, мы использовали мезомасштабную негидростатическую модель динамики атмосферы и переноса примеси в областях со сложным рельефом, разрабатываемую в ИВМиГ СО РАН с непосредственным участием авторов. Основными уравнениями модели являются три уравнения движения для нахождения компонент вектора скорости ветра, уравнения переноса тепла и влаги, уравнения неразрывности. В модели также рассчитывается температура подстилающей поверхности. 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 [8]. Вариационный подход обеспечивает энергетическую сбалансированность разностных схем, а также точный учет естественных краевых условий на границах области моделирования. Для учета топографии исследуемой территории используются идеи метода «фиктивных» областей [1]. Более детальное описание модели динамики атмосферы и переноса примеси и используемых методов численной реализации приведено в ряде работ [10; 11; 17; 18].

Для проведения численных исследований модель адаптировалась к топографии 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 находящегося в свободном доступе данных интерферометрической съемки земного шара – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [15].

Геоинформационная часть информационно-вычислительного комплекса сценарного моделирования состоит из двух блоков. Один из них предназначен для получения входной информации для численной модели. Здесь строится координатно привязанная к общегеографическому пространству двумерная расчетная сетка для области моделирования, из доступных цифровых моделей извлекаются данные о

рельефе, категориях землепользования и типов подстилающей поверхности области моделирования, вся полученная информация привязывается к узлам расчетной сетки и экспортируется в форматы, используемые в численном моделировании. Другой блок предназначен для отображения, обработки и анализа в среде ГИС результатов численных экспериментов. Здесь с использованием как системного, так и специально созданного авторского инструментария результаты моделирования привязываются к географическому пространству, строятся поля распределений исследуемых характеристик атмосферы. Геоинформационная обработка результатов сценариев численного моделирования и дальнейший их анализ позволяют построить карты пространственных распределений метеоэлементов и концентраций атмосферных примесей для каждого сценария. Это особенно важно для выявления далеко не очевидных участков, потенциально подверженных загрязнению, что позволяет определить места с наибольшим потенциалом изменений характеристик микроклимата и качества атмосферы.

Городская застройка, замерзшие или открытые водоемы и другие особенности территории учитываются в модели динамики атмосферы при задании соответствующих различий в значениях параметров, описывающих характеристики подстилающей поверхности: значения альбедо и параметра шероховатости поверхностей, различия начального распределения температуры и др. Эти различия имеют как пространственное, так и сезонное распределение.

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

Используемая модель и сценарный подход позволяют изучать закономерности формирования полей концентрации при-

месей как от действующих, так и от потенциально возможных источников в регионе. Использование условных единиц в расчетах концентраций загрязнений позволяет, зная мощности выбросов каждого вида примесей для каждого из источников, достаточно просто получить оценочные значения концентраций и в натуральных единицах.

Для настройки модели к климатическим условиям региона необходимо задать распределение крупномасштабных полей метеоэлементов. В настоящей работе для расчета сценариев задавались различные варианты распределения метеополей, опирающиеся на значения климатических норм для соответствующих полей метеоэлементов в каждом из исследуемых периодов года. Уже с таким набором параметров и распределений фоновых полей решалась задача установления квазипериодического режима, отражающего суточное поведение полей метеоэлементов над выбранной территорией. Практически проверено, что для выхода на квазипериодический режим достаточно 2...3 сут модельного времени.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенные численные эксперименты можно условно разбить на две части. Первая из них касается сценариев, связанных с условиями, характерными для зимнего периода, когда территория региона подвержена воздействию Азиатского антициклона. В летний период для атмосферы г. Чита большую угрозу представляют лесные пожары в окрестностях города. Второй блок расчетных сценариев ориентирован на моделирование этих ситуаций.

Зимний сценарный расчет. Важная черта мезоклимата многих городов сибирского региона – формирование температурных инверсий (приземных и/или приподнятых) в зимний период [4]. Инверсионное распределение температуры затрудняет вертикальное перемешивание слоев воздуха, что приводит к застойным явлениям в атмосфере. Рельеф местности способствует формированию инверсионных условий. Исследованию влияния инверсионных условий на качество атмосферы в городах России посвящены работы [3; 13].

Для моделирования атмосферных циркуляций в окрестностях г. Чита выбрана область 100×100 км² (рис. 1). По вертикали расчеты велись до высоты 4,2 км. На рис. 1 выделены городская застройка, водоемы и три рассматриваемых источника загрязнения атмосферы.

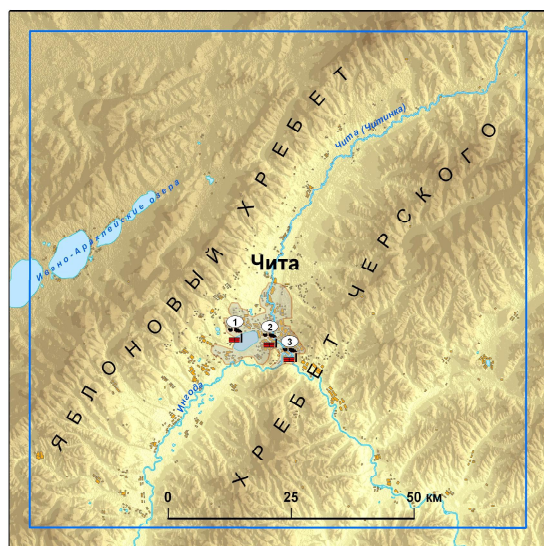


Рис. 1. Область моделирования /
Fig. 1. Area of modelling

Численные расчеты проводились на сетке $200 \times 200 \times 50$ узлов с шагами 500 м по горизонтали, по вертикали шаг был неравномерным: от 30 м над поверхностью, постепенно увеличивающийся к верхней границе области до 200 м.

Зимний сценарий рассмотрен со штилевыми ветровыми фоновыми условиями. Температура поверхности в начальный момент времени полагалась равной -25 °С. Стратификация атмосферы задавалась устойчивой.

В эксперименте предполагалось, что развитие циркуляций происходит только из-за температурных неоднородностей подстилающей поверхности в условиях сложного рельефа, поскольку фоновый набегающий поток отсутствует.

В рамках описанного сценария на фоне моделируемой метеорологической ситуации мы рассмотрели процесс переноса пассивных невесомых (не имеющих соб-

ственной скорости осаждения) примесей от трех точечных источников. Местоположение модельных источников на расчетной сетке задано максимально близко к локализации промышленных труб двух ТЭЦ и котельной г. Чита. 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 являются нулевыми.

Анализ результатов моделирования показал, что в рамках рассматриваемого зимнего сценария в Читино-Ингодинской котловине формируется инверсионное распределение температуры: подстилающая поверхность и прилегающий к ней воздух холоднее, чем слои воздуха, располагающиеся выше. При таких условиях вертикальное перемешивание в нижних слоях затруднено, что способствует накоплению загрязняющих примесей от источников выбросов, располагающихся внутри инверсионного слоя. В нашем сценарии источники выбросов располагаются достаточно высоко над поверхностью, благодаря этому и очень слабому вертикальному рассеиванию загрязняющие выбросы остаются либо в верхней части инверсионного слоя, либо рассеиваются выше него.

На рис. 2 представлены изолинии концентраций пассивных примесей на высоте 30 м, 90 м и 120 м над поверхностью в дневное время, когда температурная приземная инверсия наиболее ослаблена за счет нагрева подстилающей поверхности. На рисунках видно, что концентрации на уровне 30 м значительно ниже, чем на высоте 90 и 120 м. Таким образом, сформировавшийся инверсионный слой может оказаться благоприятным метеорологическим фактором при наличии только высотных источников загрязнения, однако при отсутствии низких.

Также можно отметить, что от источника № 1 загрязнение преимущественно переносится на юг и юго-запад по долине, в противоположную сторону от основной го-

родской застройки, а от двух других источников примеси рассеиваются в юго-восточном направлении. Соответственно, можно сделать вывод, что в условиях рассмотренного зимнего сценария менее всего на ка-

чество атмосферы г. Чита влияют выбросы от источника № 1, в то время как выбросы от источников № 2 и № 3 рассеиваются в атмосфере центральной и юго-восточной части города.

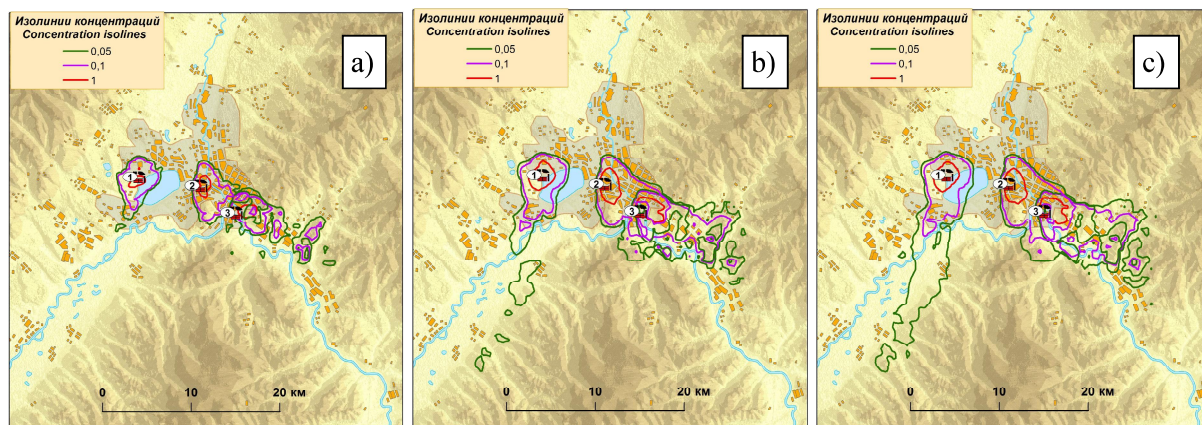


Рис. 2. Изолинии концентраций пассивных примесей (усл. ед.) в 15 ч местного времени: а) на высоте 30 м над поверхностью; б) 90 м; в) 120 м / Fig 2. Isolines of passive pollutant concentration (conventional units) at 3 p.m. of local time: a) at the height of 30 m above the surface; b) 90 m; c) 120 m

Летние сценарные расчеты. Предложенная технология использовалась авторами и для изучения процессов распространения дымовых шлейфов от пожара в окрестностях г. Чита в летнее время. Область моделирования и параметры расчетной сетки совпадают с областью и сеткой, используемыми в зимнем сценарии. Источник возгорания задавался в районе с. Сивяково, к юго-западу от г. Чита.

Здесь рассмотрены два сценарных расчета: сценарий с южным фоновым ветровым потоком 7 м/с и сценарий с юго-западным фоновым ветром 5 м/с.

В расчетах с фоновым ветром формирование атмосферных циркуляций происходит за счет неравномерного прогрева орографически сложной подстилающей поверхности и взаимодействия возникающих воздушных течений с фоновым набегающим потоком. В численных экспериментах значение скорости фонового ветра задавалось и фиксировалось на верхней границе расчетной области. Значения крупномасштабных фоновых полей метеоэлементов задавались в соответствии с данными о погодных условиях в регионе 10–12 июля

2015 г. В это время, по сообщениям пресслужбы «Забмедиа» со ссылкой на Гослесслужбу, в Читинском районе, недалеко от с. Сивяково уже несколько дней действовал пожар. Первый очаг возгорания обнаружен 7 июля 2015 г. К 10 июля столб дыма стал хорошо виден в г. Чита и, начиная с этого времени, дымовой шлейф начал распространяться над котловиной, в которой расположен город.

В численных экспериментах мы рассмотрели одиночный очаг возгорания. Начальная локализация пожара в модели задавалась в соответствии с данными о пожарной ситуации на 12 июля 2015 г. В сценарных расчетах при параметризации разрастающегося очага пожара, как источника выброса моделируемой невесомой пассивной примеси, опирались на оценочные данные о скорости распространения огня. Так как динамика и тип пожара детально не моделировались, то для имитации выбросов от него в экспериментах полагалось, что непосредственно над очагом на высоте 30 м примесь имела начальную скорость вертикального распространения 1 м/с. Для простоты положено, что в каждой ячейке сеточной

области, находящейся в зоне возгорания, происходит выброс мощностью 1 условная единица в секунду.

Горизонтальные сечения полей примеси на высоте 30 м над подстилающей по-

верхностью, демонстрирующие результаты численных экспериментов по этим сценариям, представлены на рис. 3.

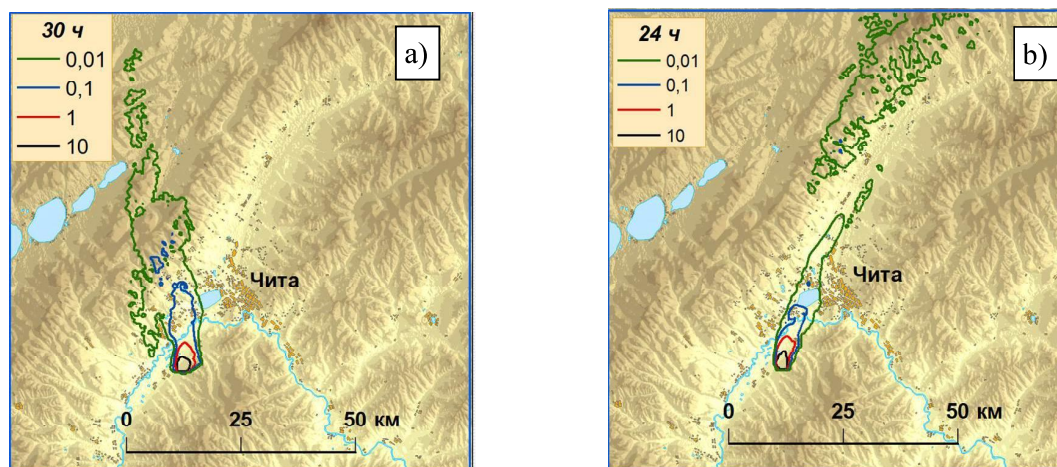


Рис. 3. Изолинии поля примеси на высоте 30 м над поверхностью: а) сценарий с южным фоновым ветром 7 м/с, б) сценарий с юго-западным фоновым ветром 5 м/с / Fig. 3. Isolines of passive pollutant concentration (conventional units) at the height of 30 m above the surface: a) south basic state wind 7 m/s; b) south-western basic state wind 5 m/s

Анализ результатов расчетов для модельного сценария с южным фоновым ветровым потоком показал, что дымовой шлейф от выбранного нами случая пожара в результате взаимодействия с локальными атмосферными циркуляциями, формирующимися в течение суток над неравномерно прогреваемой поверхностью, будет распространяться в основном на северо-запад поперек Читино-Ингодинской впадины и перенесется через Яблонувый хребет. Перенос дымовой взвеси в северном направлении, захватывающий атмосферу над окраиной города, в эксперименте наблюдался только в ранние утренние часы.

На рис. 3, б представлены результаты расчетов для сценария с юго-западным внешним набегающим фоновым потоком. Поскольку направление фонового ветра совпадает с основным направлением Читино-Ингодинской впадины, то этот ветровой поток претерпевает суточные трансформации в значительно меньшей степени, чем южный фоновый. В результате дымовой шлейф в продолжение всего модельного

времени переносился с различной степенью интенсивности, обусловленной ослаблением юго-западного ветра в дневные часы восходящими потоками над склонами долины, в северо-восточном направлении на город.

Таким образом, результаты моделирования в основном соответствуют реальным картинам задымления городской атмосферы, которые регулярно наблюдают жители Читы летом.

Выводы. Анализ результатов численных экспериментов позволяет сделать вывод, что используемая модель в целом адекватно описывает как процессы формирования приземных и приподнятых инверсий в Читино-Ингодинской впадине, так и процессы распространения загрязняющих примесей в ее атмосфере.

Эксперименты показали, что даже в отсутствие фонового набегающего потока изолинии концентраций загрязнений имеют достаточно сложный характер, обусловленный влиянием рельефа и температурных неоднородностей подстилающей поверхности. Таким образом, можно констатиро-

вать, что местные локальные атмосферные циркуляции оказывают существенное влияние на перераспределение примесей над территорией города.

Используемая модель и сценарный подход позволяют детально изучать закономерности формирования полей концентрации примесей как от действующих, так и от потенциально возможных источников в регионе. Предположение об отсутствии собственной скорости осаждения у примесей

(невесомая примесь) позволяет изучать ветровые движения и их суточную трансформацию по деформации изолиний примесей на картах.

Использование методов математического моделирования и современных геоинформационных технологий особенно актуально при изучении изменений качества воздушной среды территории в результате перехода предприятий на новые технологии и новые виды топлива.

Список литературы

1. 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.
2. Барт А. А., Старченко А. В., Фазлиев А. З. Информационно-вычислительная система для краткосрочного прогноза качества воздуха над территорией г. Томск // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 7. С. 594–601.
3. 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.
4. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере / под ред. Э. Ю. Безуглой, М. Е. Берлянда. Ленинград: Гидрометеоздат, 1983. 328 с.
5. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
6. Михайлюта С. В., Леженин А. А., Тасейко О. В., Битехтина М. А. Экологическая индустрия: ветровые потоки в городской застройке Красноярска // Инженерная экология. 2012. № 3. С. 26–37.
7. Пененко В. В. Развитие концепции природоохранного прогнозирования для оперативного анализа и прогноза критических ситуаций в городских агломерациях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 4. № 1. С. 70–73.
8. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
9. Пененко В. В., Цветова Е. А. Математическое моделирование климато-экологических процессов урбанизированных территорий // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 06. С. 509–514.
10. Пьянова Э. А. Исследование трансформации воздушного потока над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10. № 3. С. 106–111.
11. 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.
12. Фалейчик Л. М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Информационные технологии. 2012. Т. 10. № 2. С. 14–24.
13. Ячмёнева Н. В., Гольвей А. Ю. Повторяемость инверсий и их влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске // Вестник Челябинского государственного университета. 2011. № 5 (220). С. 84–89.
14. Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models / ed. A. Baklanov, A. Makhura, R. Sokhi. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
15. Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe. Version 4. 2008. Available at: <http://www.цицсrtm.csi.cgiar.org> (Date of access: 12.09.2017).
16. Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Pitta A., Taseiko O. V. Urban wind fields: Phenomena in transformation // Urban Climate. 2017. Vol. 19. P. 122–140.
17. 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. Issue 2. P. 319–330.

18. Pyanova E. A., Penenko V. V., 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).

19. Pyanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. Simulation of winter mesoclimates in Krasnoyarsk urban agglomeration // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104666J (30 November 2017).

References

1. Aloyan A. E., Faleychik A. A., Faleychik L. M. *Matematicheskie modeli ratsionalnogo prirodopolzovaniya* (Mathematical models of rational environmental use). Novosibirsk: Nauka, 1989, pp. 14–35.
2. Bart A. A., Starchenko A. V., Fazliev A. Z. *Optika atmosfery i okeana* (Atmospheric and oceanic optics), 2012, no. 25 (7), pp. 594–601.
3. Bitekhtina M. A., Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Taseiko O. V. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of the Kemerovo State University), 2012, no. 4 (2), pp. 143–148.
4. *Klimaticheskie kharakteristiki usloviy rasprostraneniya primesey v atmosfere* (Climatic characteristics of the conditions for the propagation of impurities in the atmosphere) / ed. E. Yu. Bezuglaya, M. E. Berlyand). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, 328 p.
5. Marchuk G. I. *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushey sredy* (Mathematical Modeling in the Problem of Environment). Moscow: Nauka, 1982. 320 p.
6. Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Taseiko O. V., Bitekhtina M. A. *Inzhenernaya ekologiya* (Engineering ecology), 2012, no 3, pp. 26–37.
7. Penenko V. V. *Interexpo Geo-Sibir* (Interexpo Geo-Siberia), 2017, no. 4 (1), pp. 70–73.
8. Penenko V. V., Aloyan A. E. *Modeli i metody dlya zadach ohrany okruzhayushey sredy* (Models and methods for environment protection problems). Novosibirsk: Nauka, 1985. 256 p.
9. Penenko V. V., Tsvetova E. A. *Optika atmosfery i okeana* (Atmospheric and oceanic optics), 2017, no. 30 (6), pp. 509–514.
10. Pyanova E. A. *Vychislitelnye tehnologii*. (Computational Technologies), 2005, vol. 10. no. 3, pp. 106–111.
11. Pyanova E. A., Faleychik L. M. *Vychislitelnye tehnologii* (Computational Technologies). 2012, no. 17 (1), pp. 109–119.
12. Faleychik L. M. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Informacionnye tehnologii* (Novosibirsk State University Journal. Ser. Information Technologies), 2012, no. 10 (2), pp. 14–24.
13. Yachmeneva N. V., Golvey A. Yu. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of the Chelyabinsk State University), 2011, no. 5 (220), pp. 84–89.
14. *Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models* (Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models) / ed. A. Baklanov, A. Makhura, R. Sokhi. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
15. Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. *Hole-filled SRTM for the globe* (Hole-filled SRTM for the globe). Version 4. 2008. Available at: <http://www.srtm.csi.cgiar.org> (Date of access: 12.09.2017).
16. Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Pittd A., Taseiko O. V. *Urban Climate* (Urban Climate), 2017, vol. 19, pp. 122–140.
17. Penenko V., Tsvetova E. *J. of Computation and Applied Mathematics* (J. of Computation and Applied Mathematics), 2009, vol. 226, issue 2, pp. 319–330.
18. Pyanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. *Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics* (Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics). 100356D (November 29, 2016).
19. Pyanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. *Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics* (Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics). 104666J (November 30, 2017).

Коротко об авторах

Пьянова Эльза Андреевна, канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: охрана окружающей среды, математическое моделирование, численные методы и эксперименты, природные ресурсы, географические информационные системы
pianova@ngs.ru

Фалейчик Андрей Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: математическое моделирование, численные методы и эксперименты, геоэкология
faa55@bk.ru

Фалейчик Лариса Михайловна, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Чита, Россия; доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: геоинформационные системы и технологии, геоэкология, математическое моделирование
lfaleychik@bk.ru

Briefly about the authors

Elza Pyanova, candidate of physical and mathematical sciences, research scientist, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch (ICMMG SB RAS), Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: environment protection, mathematical modeling, calculus of approximations and experiments, natural resources, geographic information system

Andrey Faleychik, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: mathematical modeling, calculus of approximation and experiments, geoeology

Larisa Faleychik, candidate of technical sciences, associate professor; senior research scientist, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch (INREC SB RAS), Chita, Russia; associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: geographic information system and technologies, geoeology, mathematical modeling

Образец цитирования

Пьянова Э. А., Фалейчик А. А., Фалейчик Л. М. Использование математического моделирования для оценки экологических последствий реиндустриализации экономики региона // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2017. Т. 23. № 12. С. 41–50. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-12-41-50.

Pyanova E., Faleychik A., Faleychik L. Use of mathematical modeling for estimation of environmental consequences of the regional economy reindustrialization // Transbaikal State University Journal, 2017, vol. 23, no. 12, pp. 41–50. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-12-41-50.

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

Дата поступления статьи: 08.12.2017 г.
Дата опубликования статьи: 25.12.2017 г.