

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СРЕДНЮЮ КОТЛОВИНУ ОЗ. БАЙКАЛ¹

Зароднюк Максим Сергеевич

К.ф.-м.н., н.с., e-mail: max@isem.irk.ru

Иванов Роман Андреевич

К.т.н., н.с., e-mail: crowndriver@gmail.com

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Кучменко Екатерина Владимировна

К.г.н., зам. директора филиала, Сибирское отделение ФГБУ "Росгеолфонд"
664007 г. Иркутск, ул. Декабрьских Событий 29, e-mail: takate63@yandex.ru

Аннотация. Обобщены экспериментальные исследования загрязнения атмосферы промышленных центров и моделирование его влияния на побережье средней котловины Байкала. Информация о содержании минералов диоксида серы, сульфатов, оксидов азота, нитратов в атмосфере и атмосферных отложений (аэрозоль, осадки, снежный покров) анализируется для определения влияния региональных источников на состав атмосферы над средним Байкалом. Количество оксидов серы и азота, поступающих в среднюю котловину озера Байкал из крупных источников, оценивается на основе математического моделирования.

Ключевые слова: рецепторное моделирование, идентификация источников выбросов, снегосъемка, триангуляция Делоне.

Цитирование: Зароднюк М.С., Иванов Р.А., Кучменко Е.В. Моделирование антропогенного воздействия на среднюю котловину оз. Байкал // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 4 (12). С. 128–137. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-13

Введение. В связи с развитием промышленности в Байкальском регионе и расширением инфраструктуры туристско-рекреационных территорий прибрежной зоны оз. Байкал антропогенные воздействия на его экосистему постоянно возрастают. Эти обстоятельства делают особо актуальной проблему оценки влияния антропогенных источников на качество атмосферы над акваторией озера и величину выпадения загрязняющих веществ из атмосферы, возникает необходимость в оценке переноса и рассеивания выбросов загрязняющих веществ от региональных источников, а также их выпадения на акваторию центрального Байкала.

В работе проанализированы данные о содержании минеральной серы (диоксида серы и сульфатов) и азота (оксидов азота и нитратов) в пробах атмосферных выпадений (снежный покров), которые отобраны в различных районах средней котловины озера Байкал. Рассчитаны количества атмосферных выпадений серы и азота на подстилающую поверхность в зоне атмосферного влияния и в центральной экологической зоне (ЦЭЗ) Байкальской природной территории (БПТ) на основе моделирования переноса диоксида

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18–57–81001-ЕАПИ_а, 17–29–05068-офи_м)

серы, сульфатов, оксидов азота и нитратов. Выявлены количественные оценки доли выбросов соединений серы и азота, достигающих средней котловины оз. Байкал, от крупных стационарных источников Республики Бурятия, путем совместной интерпретации данных экспериментальных наблюдений и результатов математического моделирования.

Идентификация источников выбросов методами рецепторного моделирования.

Традиционно для оценки воздействия промышленных предприятий на окружающую среду решается задача расчета рассеивания выбросов, когда известны координаты, мощность и другие характеристики источников, а также метеорологические параметры, определяющие интенсивность переноса и диффузии примесей. Неизвестной при этом считается концентрация в любой заданной точке. Эти модели строятся на решении системы основных уравнений гидродинамики (неразрывности, движения, переноса тепла, влаги и примеси) либо рассматривается только уравнение баланса (переноса) атмосферных примесей [1, 3]. В большинстве моделей принимается допущение, согласно которому турбулентный поток примеси пропорционален среднему градиенту концентрации. Тогда уравнение переноса примеси принимает вид:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\partial w_a c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial c}{\partial z} + E, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точки пространства в декартовой системе координат; c – объемная концентрация примеси, г/м^3 ; t – время; k_z и k_y – коэффициенты турбулентности по вертикали и горизонтали, w_a – собственная вертикальная скорость примеси; E – суммарный поток примеси в системе.

При введении ряда допущений, в частности, считая задачу стационарной и направив ось Ox вдоль вектора горизонтальной скорости ветра, можно получить аналитическое решение. Так, в [3] для приземной концентрации, создаваемой источником, было получено решение вида

$$c(x, y) = \frac{Q \cdot \exp\left(-\frac{R}{x} - \frac{y^2}{2\varphi_0^2 x^2}\right)}{(1+n) \cdot k_1 \cdot \varphi_0 x^2 \sqrt{2\pi}}, \quad (2)$$

где Q – выброс вещества от источника в единицу времени, $R = \frac{u_1 H^{1+n}}{k_1 (1+n)^2}$, k_1 и u_1 – величина коэффициента турбулентности и модуль скорости ветра на высоте 1 метр, φ_0 – дисперсия направления ветра за период, равный времени забора проб (20-30 мин), n – показатель степени (используется степенной закон для описания возрастания скорости ветра с высотой), H – высота подъема факела.

В настоящее время разработаны десятки (возможно, сотни) моделей рассеивания и выпадения. При их применении степень достоверности полученных решений определяется, по крайней мере, двумя факторами: наличием подробной и достоверной метеорологической информации о поле ветра, температурной стратификации, а также поглощающих свойствах подстилающей поверхности и интенсивности осадков (для оценки выпадения); качеством аппроксимаций, описывающих влияние рельефа. Таким образом, возникает необходимость решения обратной задачи – восстановление полей загрязнения снежного покрова.

Основными принципами постановки обратной задачи определены: проведение балансовых оценок, основанных на количестве рассматриваемого компонента в сжигаемом топливе, золе и природных средах; использование принципа минимизации ошибок при сравнении модельных оценок и результатов замеров. Предполагается, что на некоторой заданной территории расположены n источников, причем (X_j, Y_j) – координаты j -го источника, например, котельной $j = \overline{1, n}$. Каждая котельная выбрасывает в воздушный бассейн m основных компонентов Q_{ij} (кг/ч), $i = \overline{1, m}$. По массе выбросов составляются балансовые уравнения, т.е. количество (масса, кг/м²·ч) конкретной компоненты в данной точке $M_i(X_k, Y_k)$ равна сумме выбросов, умноженных на весовые коэффициенты, по всем источникам этой компоненты, за исключением выноса этой компоненты за пределы наблюдаемой территории.

С учетом этих предположений, баланс записывается в виде системы линейных уравнений:

$$M_i(X_k, Y_k) = \sum_{i=1}^n Q_{ij} x_{jk} - \sum_{i=1}^n Q_{ij} P_j, \quad (3)$$

где $M_i(X_k, Y_k)$ – масса i -ого вещества в k -ой точке замера; Q_{ij} – выброс i -го вещества j -ым источником; x_{jk} – вклад этого источника в k -ой точке замера, $k = \overline{1, r}$; P_j – перенос вещества за пределы рассматриваемой системы (дальний перенос). Здесь и далее – X и Y – координаты, x – матрица вкладов или связей между источником и рецептором.

В принципе, для идентификации источников выбросов на основе принципов "fingerprints" достаточно ограничиться балансовыми зависимостями. Идеальным является случай, когда соотношение между концентрациями поллютантов разные, что обеспечивается различиями: используемого сырья, режимами производств, степенями очистки выбросов. В случае предельно близких по всем параметрам источников, для формирования их "fingerprints" необходимо использовать нормативные методики. При таком подходе задача идентификации примет вид:

$$\sum_{k=1}^r \delta_{ik}^2 = \sum_{k=1}^r ([M_i(X_k, Y_k) - \sum_{j=1}^n x_{jk} Q_{ij} + \sum_{j=1}^n Q_{ij} P_j])^2 \xrightarrow{x_{jk}} \min. \quad (4)$$

Ее решение сводится к матричному уравнению

$$Q^T Q x = Q^T M, \quad (5)$$

которое решается аналитически –

$$x = (Q^T Q)^{-1} Q^T M, \quad (6)$$

при условии, что $\text{rang} Q = n$, что на практике достигается автоматически, если количество поллютантов не меньше количества источников. Для получения дольных (процентных) характеристик вкладов элементы в столбцах матрицы x усредняются по сумме.

Более точными принято считать модели, дополненные функциями распределения вредных примесей. Традиционно, в построении такого рода связей принято опираться на нормальный закон распределения, который при $x \geq 0$ описывается формулой

$$f(x) = a \exp(-s(l - R)^2), \quad (7)$$

где f – выпадение (концентрация) примеси в точке-рецепторе, a – максимальное значение функции (определяется интенсивностью выброса), R – расстояние от источника до точки максимального выпадения, l – расстояние от источника до точки-рецептора, s – коэффициент, обратный интенсивности выпадений.

Для характеристики интегрального поля выпадений за период была сконструирована функция двух пространственных переменных. Среди свойств поверхности, описывающей поле выпадений от одиночного источника выбросов, можно перечислить следующие:

- 1) точка, соответствующая координатам источника, – стационарная, соответствует минимуму функции распределения, более того, имеет нулевое значение;
- 2) на бесконечности значения функции стремятся к нулю;
- 3) по данным наблюдений функция имеет два локальных максимума, на наиболее повторяющихся направлениях ветра от источника (в городах Восточной Сибири угол между двумя направлениями ветра наибольшей повторяемости почти всегда близок к 180°);
- 4) функция должна в какой-то части суперпозиции соответствовать нормальному закону распределения, что не противоречит второму и третьему свойству.

С учетом вышеперечисленных особенностей, в качестве распределения i -го компонента от j -го источника предлагается функция

$$F_i(X, Y) = \left[A_i((X^j - X) \cos \varphi - (Y^j - Y) \sin \varphi)^2 + B_i((X^j - X) \sin \varphi + (Y^j - Y) \cos \varphi)^2 \right] \times \exp \left[-s_i (\sqrt{(X^j - X_i)^2 + (Y^j - Y_i)^2} - R_i)^2 \right], \quad (8)$$

где $\min\{A_i, B_i\}$ – соответствует максимальной концентрации i -ого вещества, тогда A_i/B_i – коэффициент преобладания направлений, (X_i, Y_i) – служебные параметры, характеризующие отклонения функции от симметричности относительно точки расположения трубы, φ – угол направления ветра. На рис. 1 изображена поверхность функции распределения, характерного для юга Восточной Сибири, одной примеси от одиночного источника.

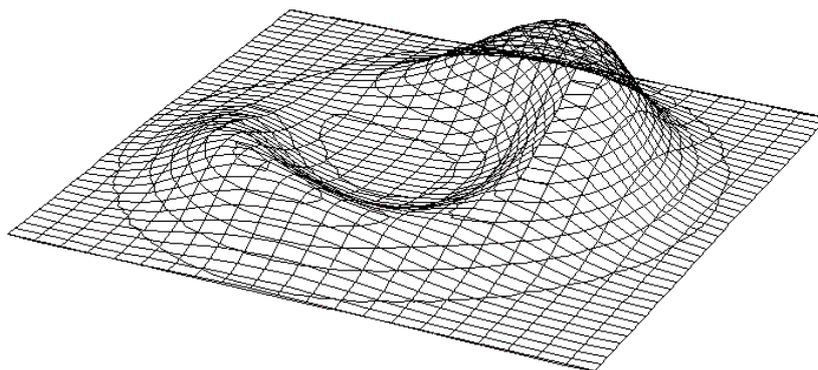


Рис. 1. Поверхность функции распределения поллютантов в снежном покрове, характерная для юга Восточной Сибири.

В задачах, решаемых в рамках данной работы, было принято опираться на функции вида (5). В качестве оценочного критерия выбирается минимизация суммы квадратов ошибок по всем точкам наблюдений. Поэтому постановка принимает следующий вид:

$$\sum_{k=1}^r \left(\sum_{i=1}^m \left(M_i(X_k, Y_k) - \sum_{j=1}^n F(\alpha_{ij}, X_k, Y_k) \right) \right)^2 \rightarrow \min_{\alpha}, \quad (6)$$

где $F(\alpha_{ij}, X_k, Y_k)$ – значения (5) в точках (X_k, Y_k) при неизвестном α , $\alpha_{ij} = (A_{ij}, B_{ij}, s_{ij}, X_i, Y_i, R_{ij}, \varphi)$ – вектор параметров. К ограничениям (3) добавляются специальные:

$$A_i > 0, B_i > 0, s_{ij} > 0, R_{ij} > 0, 0 < R_{ij} < X^j - X_i, 0 < R_{ij} < Y^j - Y_i. \quad (7)$$

Ввиду особенностей задач аппроксимации оказалось необходимым сокращение количества компонентов векторов α . Для однотипных котельных, но с разными технологическими параметрами (скорость выхода газов, высота факела) A_i/B_i , s_i – постоянны, R_{ij} отличаются на коэффициент, учитывающий эти параметры. Вышеперечисленные подходы относятся к методам рецепторного моделирования [10, 11], более подробно их применение с примерами описано в [2, 6]. Похожий подход используется в исследованиях российских ученых (например [7]).

Использование дисперсионной модели HYSPLIT. Дисперсионная модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), разработанная National Oceanic and Atmospheric Administration, позволяет осуществить трехмерное моделирование процесса формирования и распространения облака воздушных загрязнений от заданного источника. Модель HYSPLIT объединяет два классических подхода, лагранжев (траекторный) и эйлеров (континуальный): уравнения адвекции и диффузии решаются независимо в лагранжевой постановке, а расчеты концентраций выполняются в рамках эйлерова подхода, на фиксированной пространственной сетке. Отличительная особенность этой модели состоит в том, что в ней использование данных радиозондирования заменено метеорологическими данными, получаемыми из краткосрочных прогнозов по стандартным численными моделями прогноза погоды [8]. Как правило, эта информация представлена на регулярной пространственной сетке и включает в себя данные о вертикальном распределении горизонтальной и вертикальной компонент ветра, температуры и давления, а также приземном давлении и некоторых других параметрах.

В руководстве [9] представлено детальное описание и уравнения модели HYSPLIT, которые могут быть использованы для расчета прямых и обратных траекторий и концентраций загрязнителей воздуха. Структура описанной модели очень хорошо разделена по решаемым задачам, поэтому она может помочь в исследовании множества различных сценариев. Эта модель применима к объектам любого масштаба – от нескольких десятков метров до дальнего переноса. Модель HYSPLIT включает в себя несколько блоков: метеорологический; перенос; рассеивание; расчет сухого и влажного выпадения.

Выходные данные метеорологических моделей обычно не могут непосредственно использоваться моделями рассеивания без некоторой предварительной обработки, главным образом потому, что данные могут быть интерпретированы с помощью различных систем вертикальных координат. Вертикальные профили в каждой горизонтальной точке сетки линейно интерполируются к внутренней системе координат модели рассеивания

$$\sigma = (Z_{\text{top}} - Z_{\text{msl}}) / (Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}), \quad (8)$$

которая учитывает рельеф подстилающей поверхности (так называемая σ -система координат). Здесь все высоты выражены относительно среднего уровня моря, причем Z_{top} – верхний уровень системы координат модели рассеивания, Z_{gl} – уровень подстилающей поверхности, Z_{msl} – уровень моря. Внутри системы могут быть выбраны любые интервалы между уровнями по высоте над поверхностью земли. Однако, квадратичная связь между высотой (z) и модельным уровнем определена и представлена выражением $Z = 30k^2 + 25k + 5$. Это отношение появилось как результат убывающего разрешения вдали от поверхности: первый уровень ($k = 1$) – около 10 м., второй уровень – около 75 м., и т.д., пока не будет достигнут 20-ый уровень около 11500 м., после чего разница между уровнями стабильно около 1200 м.

Система горизонтальной сетки модели рассеивания разрабатывается идентично сети метеорологических данных. Три различных конформных картографических проекции поддерживаются в модели: 1) полярная стереографическая, 2) Меркатора и 3) конформная проекция Ламберта. Дискретные поля изменений метеорологических величин необходимо определять для постоянных временных интервалов. Временной интервал между полями должен быть постоянным для каждого уровня сетки.

Поля метеорологических данных можно представлять для описываемой модели в одной из четырех различных систем координат: 1) сигма давления, 2) абсолютного давления, 3) сигма поверхности и 4) смешанной абсолютного давления. Как минимум, модель требует: горизонтальные компоненты вектора ветра, температуру, высоту или давление, и давление на поверхности. Учет влажности и вертикального движения не обязателен.

Информация о перемещении и распространении вредных примесей на сайте National Oceanic and Atmospheric Administration предоставляется в виде карт траекторий и областей дисперсии. На рис. 2 приведены такие карты для трех крупных стационарных источников Республики Бурятия с переносом на Среднюю котловину озера, который происходит в 5 раз реже переноса со стороны Иркутского-Черемховского промышленного узла. Сопоставление показало, что суммарные концентрации выпадений от них на 2-3 порядка меньше, чем от Иркутско-Черемховского [4].

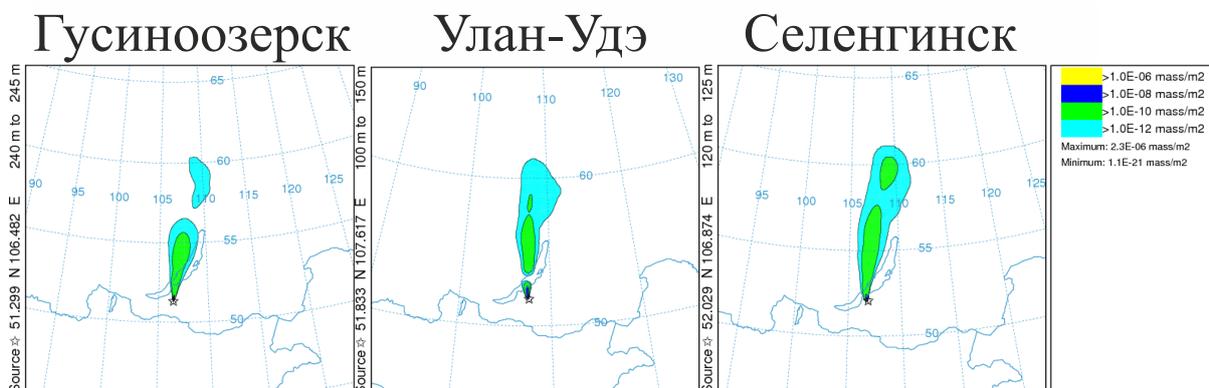


Рис. 2. Дисперсия диоксида серы от крупных источников Республики Бурятия (5.07.2015 г.)

Количественная оценка доли выбросов соединений серы и азота, достигающих средней котловины озера Байкал. Натурные наблюдения за выпадениями сульфатов и нитратов в основном производятся путем отбора проб снега и их химического анализа,

поскольку снежный покров является депонирующей средой и накапливает сухие и влажные атмосферные загрязнения в Прибайкалье в течение 3.5-4 месяцев. Он включает в себя суммарные (сухие и влажные) атмосферные выпадения оксидов серы и азота в окисленных формах – сульфаты и нитраты. Анализ проб снежного покрова позволяет исследовать пространственное распределение атмосферных выпадений более детально.

В результате снегомерных съемок в исследуемом районе выявлено, что наибольшие концентрации сульфатов обнаружены в снежном покрове Ранжуровского сельского поселения и поселка Сахюрта. Соответственно, основной вклад вносят объекты коммунального хозяйства. Замеры в районе поселка Усть-Баргузин выполнены неудачно. Содержание сульфатов в снежном покрове варьируется значительно (как в пределах одного города, так и в целом), нитраты распределяются в снежном покрове равномернее.

На основании официальных статистических данных получены оценки выбросов основных промышленных центров региона: городов Гусиноозерск, Улан-Удэ, Селенгинск. Для получения реальных данных о концентрациях антропогенных веществ в точках-рецепторах применяются современные методы химического анализа: ионная хроматография, атомная абсорбция и спектрофотометрия, рекомендованные к применению для обеспечения сопоставимости с данными в других районах мира в сетях мониторинга ЕМЕР и EANET. Получены и проанализированы данные о химическом составе снежного покрова в центральной части озера, в том числе на акватории Байкала. Объем выпадений получен численно, следующим образом. Область замеров поделена на сегменты при помощи триангуляции Делоне. В каждом треугольнике вычислен объем по формуле косоусеченной треугольной призмы. На рис. 3 приведена триангуляция карты снегосъемки, на аэрофотографическом снимке средней котловины оз. Байкал.

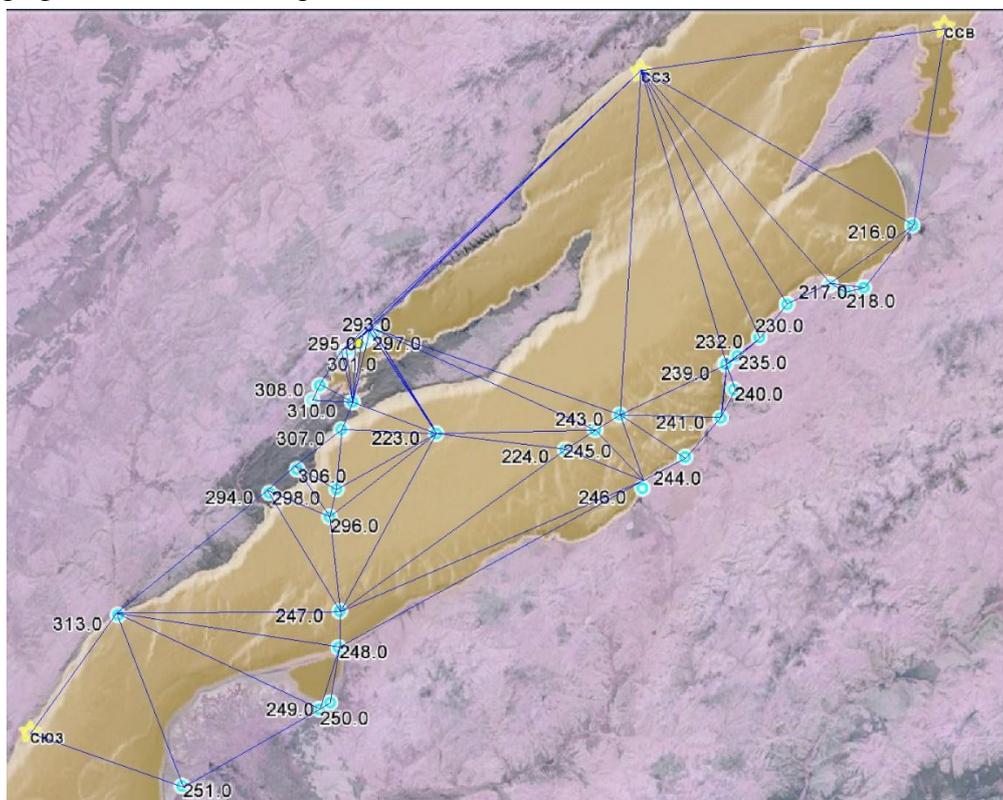


Рис. 3. Триангуляция Делоне экспериментальных наблюдений в снежном покрове Средней котловины оз. Байкал

Для визуализации данных мониторинга и результатов расчетов в геосервисе Google Earth был разработан специальный модуль для Геокомпонента, разрабатываемого в ИСЭМ СО РАН [5]. Данный модуль автоматически извлекает результаты расчетов и формирует специальный KML-файл для загрузки в геосервис. Визуализация результатов на реальных космических снимках региона и возможность трехмерного отображения дают новое качество их восприятия и расширяют возможности их обработки и интерпретации.

Заключение. В процессе выполненной работы по двум математическим моделям проведены расчеты переноса оксидов серы и азота от крупных источников, расположенных в Республике Бурятия в Среднюю котловину Байкала. При помощи модели HYSPLIT проведены расчеты переноса оксидов серы и азота от этих источников в котловину озера. По данным модельных расчетов поступление оксидов серы от источников, расположенных в зоне атмосферного влияния составляет около 3130 тонн за год. По данным экспериментальных наблюдений, на акваторию центрального Байкала за год из атмосферы поступает 550 тонн сульфатов. По данным модельных расчетов поступление в атмосферу центрального Байкала оксидов азота составляет в среднем 7800 тонн за год. Поступление нитратов на акваторию по данным экспериментальных наблюдений составляет 83 тонны.

Проведенные расчетные эксперименты показали, что доля суммарного годового выброса оксидов серы и азота предприятий Республики Бурятия на акваторию Байкала составляет менее 1%. Таким образом, из экспериментальных данных и расчетов по моделям можно заключить, что предприятия Гусиноозерска, Улан-Удэ и Селенгинска, как источники антропогенного загрязнения соединениями серы и азота атмосферы этой части озера не представляют для него опасности. Однако, за поступлениями сульфатов, нитратов и других поллютантов на акваторию средней котловины Байкала от предприятий коммунальных хозяйств и домовых печей прибайкальских населенных пунктов необходимо постоянно следить, проводя уже сформированный комплекс работ, а также дополнительные исследования с возможным привлечением российских и зарубежных экспертов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: ИВМ РАН. 2002. 200 с.
2. Балышев О.А., Зароднюк М.С., Кучменко Е.В., Чипанина Е.В. Эколого-информационные технологии: оценка вклада теплоисточников в загрязнение снежного покрова промышленных зон // Инженерная экология. 2010. № 1. С. 39–53.
3. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1975. 448 с.
4. Зароднюк М.С., Кучменко Е.В., Иванов Р.А., Чипанина Е.В. Моделирование воздействия промышленных центров Иркутской агломерации на оз. Байкал // Труды XVIII Байкальской конференции "Информационные и математические технологии в науке и управлении". Часть II. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2013. С. 199–206.
5. Иванов Р.А. Методика 3D-визуализации для поддержки принятия решений в энергетических исследованиях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. №1(37). С. 116–121.

6. Кучменко Е.В., Зароднюк М.С., Бальшев О.А., Моложникова Е.В. Идентификация вклада теплоисточников в загрязнение снежного покрова городов // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 3. С. 162–171.
 7. Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф., Шутова К.О. Оценивание полей длительного загрязнения городских территорий по данным мониторинга снегового покрова // Материалы 8-го Международного научного конгресса и выставки "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012". Новосибирск: СГГА. 2012. Т. 1. С. 143–148.
 8. Draxler R.R. The calculation of low-level winds from the archived data of a regional primitive equation model // J. Appl. Meteorol. 29. 1990. Pp. 240–248.
 9. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System. US Environmental Protection Agency Technical Memorandum ERL ARL-224, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Springs, MD., December 1997 (Revised: August 1998, September 2002). 27 p.
 10. Gordon G.E. Receptor models. Critical review // Environ. Sci. Technol. 1988. Vol. 22. № 10. Pp. 1132–1142.
 11. Hopke P.K. An introduction to receptor modeling // Elsevier science Publishers. Amsterdam. 1991. 20 p.
-

UDK 504.3.054

**MODELING THE ANTHROPOGENIC IMPACT ON MIDDLE BASIN
OF THE LAKE BAIKAL**

Maxim S. Zarodnyuk

Researcher, e-mail: max@isem.irk.ru

Roman A. Ivanov

Researcher, e-mail: crowndriver@gmail.com

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, 130, Lermontov str., Irkutsk, Russia, 664033

Ekaterina V. Kuchmenko

Deputy Director, Siberian branch of RFGF

29, Dekabr'skikh sobyitiy str, Irkutsk, Russia, 664007, e-mail: takate63@yandex.ru

Abstract. Experimental studies of the industrial centers atmospheric pollution and modelling of its influence on the coast of Middle Baikal are summarized. Information on the mineral content of sulfur dioxide, sulfate, nitrogen oxides, nitrate in the atmosphere and atmospheric deposition (aerosol, precipitation, snow cover) is analyzed to determine the impact of regional sources on the composition of the atmosphere over the Middle Baikal. Quantity of sulfur oxides and nitrogen reaching to the Middle basin of Lake Baikal from big sources are estimated on the base of mathematical modeling.

Keywords: receptor modeling, identification of emission sources, monitoring snow cover, Delaunay triangulation.

References

1. Aloyan A.E. Dinamika i kinetika gazovyh primesej i aehrozolej v atmosfere [Dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere]. Moscow. IVM RAN = The Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences. 2002. 200 p. (in Russian)
2. Balyshev O.A., Zarodnyuk M.S., Kuchmenko E.V., CHipanina E.V. EHkologo-informacionnye tekhnologii: ocenka vklada teploistochnikov v zagryaznenie snezhnogo pokrova promyshlennyh zon [Ecological information technologies: assessment of the contribution of heat sources to the pollution of the snow cover of industrial zones] // Inzhenernaya ehkologiya = Engineering ecology. 2010. № 1. Pp. 39–53. (in Russian)
3. Berlyand M.E. Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagryazneniya atmosfery [Current problems of atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1975. 448 p. (in Russian)
4. Zarodnyuk M.S., Kuchmenko E.V., Ivanov R.A., CHipanina E.V. Modelirovanie vozdejstviya promyshlennyh centrov Irkutskoj aglomeracii na oz. Bajkal [Modeling the impact of industrial centers of the Irkutsk agglomeration on the lake Baikal] // Trudy XVIII Bajkal'skoj konferencii "Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii". CHast' II. = Proceedings of the XVIII Baikal Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management". Part II. Irkutsk. ISEHM SO RAN. 2013. Pp. 199–206. (in Russian)
5. Ivanov R.A. Metodika 3D–vizualizacii dlya podderzhki prinyatiya reshenij v ehnergeticheskikh issledovaniyah [3D-visualization technique for decision support in energy research] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling. 2013. №1(37). Pp. 116–121. (in Russian)
6. Kuchmenko E.V., Zarodnyuk M.S., Balyshev O.A., Molozhnikova E.V. Identifikaciya vklada teploistochnikov v zagryaznenie snezhnogo pokrova gorodov [Identification of the contribution of heat sources to the pollution of urban snow cover] // Izvestiya RAN. Energetika. = Proceedings of the RAS. Energy. 2006. № 3. Pp. 162–171. (in Russian)
7. Yaroslavceva T.V., Raputa V.F., SHutova K.O. Ocenivanie polej dlitel'nogo zagryazneniya gorodskih territorij po dannym monitoringa snegovogo pokrova [Evaluation of fields of long-term pollution of urban areas according to monitoring of snow cover] // Materialy 8-go Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa i vystavki "Interehkspo GEO-Sibir'-2012" = Proceedings of the 8th International Scientific Congress and Exhibition "Interexpo GEO-Siberia-2012". Novosibirsk: SGGa, 2012. T. 1. Pp. 143–148. (in Russian)
8. Draxler. R.R., The calculation of low-level winds from the archived data of a regional primitive equation model // J. Appl. Meteorol. 29. 1990. Pp. 240-248.
9. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System. US Environmental Protection Agency Technical Memorandum ERL ARL-224, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Springs, MD., December 1997 (Revised: August 1998, September 2002). 27 p.
10. Gordon G.E. Receptor models. Critical review // Environ. Sci. Technol. 1988. Vol. 22. № 10. Pp. 1132-1142.
11. Hopke P.K. An introduction to receptor modeling // Elsevier science Publishers. Amsterdam. 1991. 20 p.