

В.К. Аргучинцев, А.В. Аргучинцева, М.А. Крейсик

## Оценка влияния на озеро Байкал аэропромвыбросов региональных источников

Иркутский государственный университет

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

На основе математических моделей, предложенных авторами, проводится оценка влияния региональных предприятий на загрязнение атмосферы и водной поверхности о. Байкал.

### Введение

В настоящее время Байкал является объектом повышенного внимания ученых, правительства, населения. Сохранением его биоразнообразия и неповторимой уникальности озабочена мировая общественность. А потому необходимо четко себе представлять те нагрузки, которые озеро и его сопредельные пространства испытывают в результате антропогенной деятельности, с целью принятия своевременных оптимальных решений. Надо отметить, что история человеческого общества знает немало примеров, когда от успешного решения возникающих проблем зависело его дальнейшее устойчивое развитие.

На юге Иркутской области, в основном в долине р. Ангары, а также непосредственно на побережье Байкала сосредоточены крупные промышленные комплексы. Так, например, только в Иркутске, по данным последней инвентаризации, зарегистрировано 156 объектов, на которых функционируют 3267 различного рода источников, выбрасывающих в атмосферу города 117 ингредиентов. Ориентация долины р. Ангары способствует направленному переносу загрязняющих веществ преобладающими северо-западными ветрами в пограничном слое атмосферы. Немаловажную роль в процессах распространения примесей играют и климатические особенности Восточной Сибири: резкоконтинентальный климат, большая повторяемость штилевых ситуаций, приземных и приподнятых инверсий, особенно в периоды максимальной отопительной нагрузки, небольшое количество осадков. Все это способствует возникновению больших концентраций ингредиентов и накоплению аэрозольных частиц в непосредственной близости от их источников.

### 1. Анализ многолетних рядов метеорологических характеристик изучаемого региона

Обработка многолетних данных наблюдений метеорологических станций и постов Приангарья позволила для наглядности представить потенциал атмосферы к самоочищению в крупных промышленных центрах в виде климатических эллипсов рассеяния. В частности, эллипсы рассеяния для декабря и апреля изображены на рис. 1.

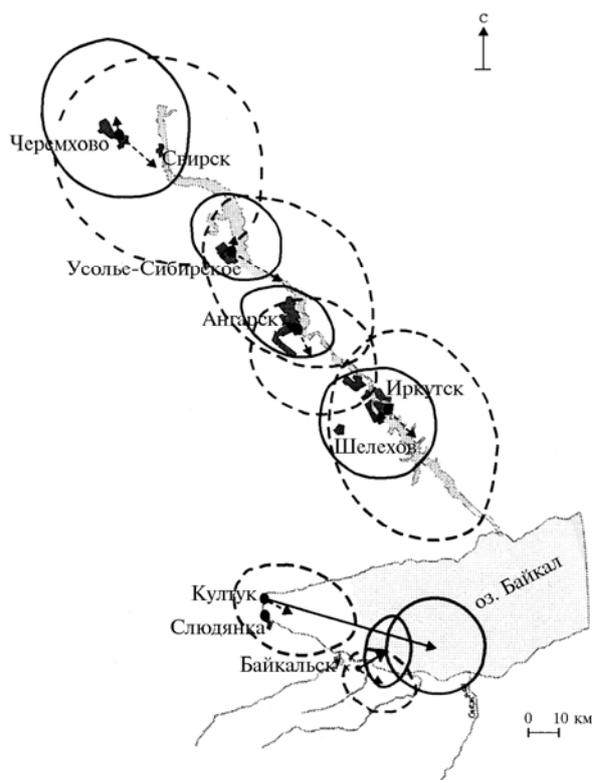


Рис. 1. Климатические эллипсы рассеяния ветрового потока и результирующие векторы скорости ветра (1 м/с соответствует 10 мм) для апреля (штриховая линия) и декабря (сплошная)

В декабре в Восточной Сибири устанавливается азиатский антициклон, характерными особенностями которого являются повышенное атмосферное давление, приземные и приподнятые инверсии в сочетании со слабыми ветрами. В это время года примеси от приподнятых источников Приангарья концентрируются преимущественно вблизи источников выбросов, создавая высокий потенциал загрязнения атмосферы. Однако в районе Южного Байкала из-за больших температурных перепадов водной поверхности и суши возникают ветры с сильной муссонной составляющей, обеспечивающей перенос примесей, выбрасываемых промышленными предприятиями Бай-

кальска, Култука, Слюдянки в сторону Байкала, причем могут иметь место области суперпозиции полей загрязнения (см. рис. 1).

С увеличением поступления солнечной радиации в конце зимы происходит постепенное разрушение азиатского антициклона, скорости ветра заметно возрастают, достигая наибольших значений в апреле–мае. В это время года антропогенная примесь, подхваченная ветровыми потоками, перемещается на более значительные расстояния, что приводит к наложению полей загрязнения, создаваемых промышленными предприятиями (см. рис. 1). В то же время вокруг источников выброса значения концентраций уменьшаются по сравнению с зимними месяцами. В районе Южного Байкала происходит ослабление ветра, что приводит к сосредоточению примесей вокруг своих локальных источников. Следует отметить, что для указанного региона декабрь и апрель можно рассматривать как месяцы – представители года, которые характеризуют разнообразные условия рассеяния примесей.

Эллипсы рассеяния дают качественную картину возможности самоочищения атмосферы и помогают обоснованно ограничиться расчетами отдельных вариантов. Естественно, что реальная картина загрязнения может быть получена при детальном рассмотрении как метеорологических условий, так и параметров источников выброса.

## 2. Математическое моделирование зон опасных концентраций ингредиентов

Для количественной характеристики распределения частот превышения установленных норм концентраций различных ингредиентов в приземном слое атмосферы проведены численные эксперименты на основе уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова, записанного в фазовой координате концентрации  $s$ :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial [A(t, s)p]}{\partial s} = \frac{\partial^2 [B(t, s)p]}{\partial s^2}. \quad (1)$$

Здесь  $p = p(t, s)$  – дифференциальный закон распределения величины  $s$ ;  $A = \frac{\partial \bar{s}}{\partial t}$  и  $B = \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{s}^2}{\partial t}$  – соответственно средняя скорость изменения средней концентрации  $\bar{s}$  и интенсивность колебаний около этой средней в интервале  $t \in [0, T]$ .

Начальное состояние  $p(0, s) = p_0(s)$ . Граничные условия

$$\frac{\partial (Bp)}{\partial s} - Ap = 0 \quad \text{при } s \rightarrow \infty, \quad \text{и} \quad \int_0^{\infty} p(t, s) ds = 1.$$

Следуя работам [1–3]:

$$A = \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_i \bar{s}}{\partial x_i} + \frac{\partial w_g \bar{s}}{\partial x_3} - \alpha \bar{s} + \bar{F} + \frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij}^{(1)} - F^{(1)}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{k}_{ij} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_j}; \quad (2)$$

$$B = K_{ki}^{(1)} \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_i} \right)^2;$$

$$K_{ki}^{(1)} = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} u'_k(t + \tau) \int_t^{t+\tau} u'_i(t_1) dt_1 dt;$$

$$F^{(1)} = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} u'_k(t + \tau) \int_t^{t+\tau} F'(t_1) dt_1 dt;$$

$u'$  и  $F'$  – соответственно флуктуации скорости и интенсивности источников;  $\tau$  – эйлеров масштаб.

Статистическая обработка, включая расчет корреляционных функций, проводилась по данным многолетних наблюдений станций «Зима», «Залари», «Черемхово»\*, «Кутулик», «Усолье-Сибирское»\*, «Ангарск»\*, «Иркутск»\*, «Учхоз “Молодежный”» (Иркутск), «Шелехов»\*, «Патроны», «Исток Ангары», «Култуку», «Слюдянка»\*, «Выдрино», «Байкальск»\*, «Танхой». Звездочкой отмечены города, промвыбросы которых в атмосферу учтены в модели.

Значения компонент вектора скорости ветра в узлах регулярной сетки находились методом оптимальной интерполяции, ошибка которой не превосходит дисперсии случайной функции в предположении, что ошибки измерений не коррелируют между собой в различных сечениях и не коррелируют с истинными значениями функций [4].

Поле вертикальных скоростей определялось путем интегрирования уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho_\phi u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_\phi v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_\phi w}{\partial z} = 0$$

по высоте

$$w_z = -\frac{1}{\rho_\phi} \int_0^z \rho_\phi \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz,$$

где  $\rho_\phi$  – фоновая плотность, постоянная по горизонтали и изменяющаяся с высотой.

Уравнения (1)–(2) с заданием соответствующих краевых условий решались численно на основе метода расщепления [5].

Для дискретизации по времени использовался двучисленный метод многокомпонентного расщепления со схемой Кранка–Николсона на каждом дробном шаге [6]. Для сохранения свойств монотонности и позитивности производилась регуляризация по схеме А.А. Самарского [7]. При численной реализации конечно-разностных уравнений использовалась немоноотонная прогонка [8].

Построенные конечно-разностные схемы абсолютно устойчивы, имеют второй порядок аппроксимации по времени и координатам.

При моделировании процессов рассматривалась область интегрирования площадью  $400 \times 250 \text{ км}^2$  и высотой 2 км над подстилающей поверхностью. Шаг по горизонтали составлял 1000 м, по вертикали – переменный:

$$\begin{cases} 10 \text{ м} & \text{для } z < 50 \text{ м,} \\ 50 \text{ м} & 50 < z \leq 150 \text{ м,} \\ 150 \text{ м} & 150 < z \leq 300 \text{ м,} \\ 200 \text{ м} & 300 < z \leq 500 \text{ м,} \\ 500 \text{ м} & z > 500 \text{ м.} \end{cases}$$

Приведем расчеты частоты превышения средней суточной предельно допустимой концентрации (ПДК) для

оксида серы (IV) в апреле (рис. 2) и декабре (рис. 3). На этих рисунках изолиния 1 охватывает область, где опасные зоны с точки зрения нарушения указанного критерия возникают не менее 24 ч в месяц.

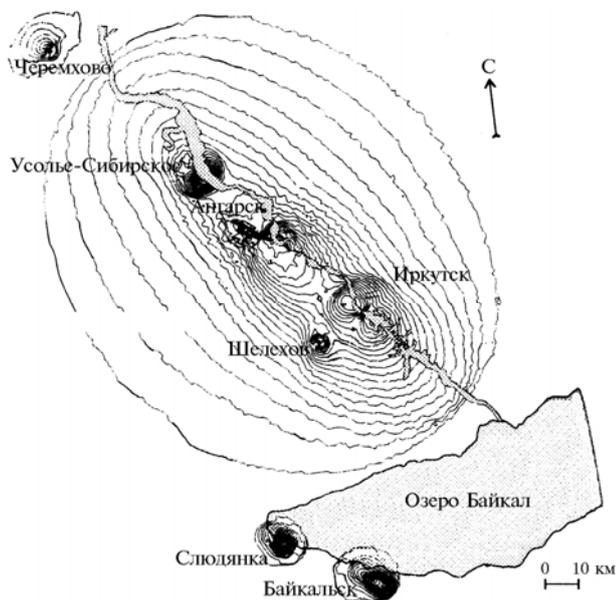


Рис. 2. Частота превышения ПДК = 0,05 мг/м<sup>3</sup> оксида серы (IV) в апреле. Шаг изолиний 24 ч

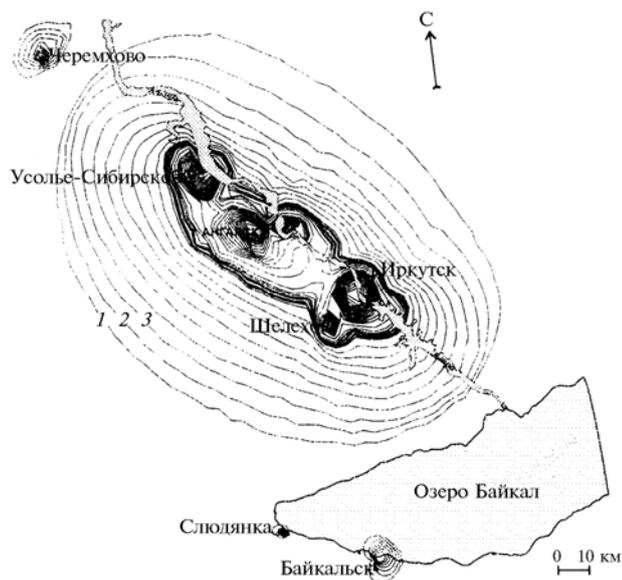


Рис. 3. Частота превышения ПДК = 0,05 мг/м<sup>3</sup> оксида серы (IV) в декабре. Шаг изолиний 24 ч

В апреле (см. рис. 2) в Приангарье велика повторяемость ветров северо-западного направления, что при-

водит к быстрому рассеянию примесей. Несмотря на то что примесь переносится на большие расстояния, ее концентрация быстро убывает и границ Байкала достигают концентрации менее ПДК. Однако непосредственно на самом Байкале в это время года преобладают штилевые ситуации, способствующие возникновению опасных зон в непосредственной близости от предприятий. В декабре (см. рис. 3) в Приангарье господствуют слабые ветры, и повторяемость опасных концентраций резко возрастает. Детальные расчеты показывают, что вокруг отдельных источников могут быть 10–20-кратные превышения ПДК. На побережье в этот месяц из-за больших перепадов температур «вода–суша» возникают довольно сильные местные ветры, за счет которых примесь быстро разносится на большие расстояния. Вследствие этого вокруг отдельных промышленных пунктов либо нет нарушений ПДК (см. рис. 3, г. Слюдянка), либо нарушения не более 1 значения ПДК возникают только вблизи предприятий (см. рис. 3, Байкальск).

### 3. Выводы и перспективы

Учет климатических характеристик и их флуктуаций для конкретной местности позволяет получить такую интегральную характеристику, как повторяемость опасных (с точки зрения установленных критериев) концентраций за рассматриваемый отрезок времени. Именно продолжительность повышенных концентраций отдельных ингредиентов на живые организмы позволяет выявить причины различных отклонений в их функционировании. Небезынтересной является перспектива установления границ нарушения ПДК для растительности особо охраняемых территорий, каковой является Байкальская территория. В настоящее время в России, к сожалению, пока нет четко разработанных критериев (за исключением Ясной Поляны).

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ, проекты № 98-05-64020, 98-05-64021 и гранта Минобразования РФ, № 97-0-13.3-12.

1. Аргуничева А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 606–609.
2. Аргуничева А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 499–502.
3. Аргуничева А.В. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 9. С. 865–870.
4. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 359 с.
5. Аргуничев В.К. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1106–1111.
6. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989. 608 с.
7. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
8. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 592 с.

*V.K. Arguchintsev, A.V. Arguchintseva, M.A. Kreissik. The assessment of air pollution of the Lake Baikal by main industrial regional enterprises.*

The assessment is given to the air and water surface pollution of the Lake Baikal by industrial enterprises of the region. The assessment is based on the mathematical models proposed by the authors.