

## Прогноз распространения выбросов проектируемого предприятия по электролизному производству алюминия

А.В. Аргучинцева, Н.В. Сирина, А.И. Щетников  
Иркутский государственный университет

В статье рассматриваются прогнозы выбросов загрязняющих веществ от алюминиевых заводов. Дана метеорологическая характеристика районов размещения заводов. По математическим моделям проведена оценка потенциально опасных зон загрязнения.

The article deals with aluminum plants emissions. Meteorological characteristics of places of the plants' dislocation are given. Evaluation of potentially dangerous pollutant zones is presented.

Ключевые слова: производство алюминия, загрязняющие вещества, ПДК, фториды, экологический прогноз

Производство первичного алюминия, особенно на старых заводах, работающих по технологии Содерберга, связано с выбросами в атмосферу ряда химических элементов и соединений, относящихся к категории загрязняющих веществ (ЗВ). Это фтористые и сернистые соединения, пыль, оксид углерода, перфторуглероды, возгоны каменноугольного пека, или так называемые смолистые вещества, значительная часть которых представлена полициклическими органическими соединениями, включая полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), и пр. [1, 2].

Масштабы и темпы наращивания мощностей по производству первичного алюминия, прежде всего в странах с избытком дешевой электроэнергии и рабочей силы, актуализируют вопросы повышения экологической безопасности этого производства и охраны окружающей среды.

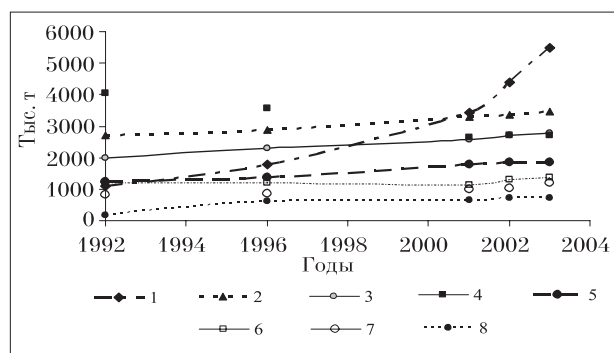


Рис. 1. Динамика мирового производства первичного алюминия по основным странам-производителям: 1 – КНР, 2 – Россия, 3 – Канада, 4 – США, 5 – Австралия, 6 – Бразилия, 7 – Норвегия, 8 – ЮАР

На рисунке 1 можно проследить динамику изменения производственных мощностей первичного алюминия за более чем 10 лет для различных стран мира [3]. Явное лидерство по производству первичного алюминия в 1992 г. принадлежало США, но к 2001 г. произошел резкий спад (более чем в 1,5 раза), после которого США вышли на некоторый фактически постоянный уровень. Наиболее резкий подъем производства первичного алюминия (в течение 10 лет почти в 5 раз) характерен для Китая, который в настоящее время опередил все развитые и развивающиеся страны.

В настоящее время с целью снижения вредных выбросов и уменьшения потребления электроэнергии при производстве алюминия рассматриваются несколько направлений. Одно из них связано с рециклингом, поскольку увеличение доли вторичного металла в товарной продукции приводит к значительному сокращению выбросов токсичных веществ, экономии электроэнергии и снижению экологической напряженности в районе производства. Однако по понятным причинам решить проблему экологической безопасности за счет только рециклинга невозможно. В любом случае производство первичного алюминия в обозримом будущем останется в качестве существенной составляющей удовлетворения возрастающей потребности человечества в этом металле.

Второе направление связано с совершенствованием существующих технологий как главного технологического процесса (электролиза расплава фтористых солей алюминия), так и улавливания отходящих газов, их

Таблица

Производство алюминия на базе гидроэнергии в различных регионах мира

Регионы	Латинская Америка	Россия	Северная Америка	Европа*	Африка	Океания	Азия
Доля алюминия произведенного с помощью гидроэнергии, %	96	82	64	44	32	23	10

Примечание: \* – Центральная Европа (без Норвегии и Исландии)

обезвреживания и утилизации [4]. В настоящее время уже довольно распространёнными являются технологии, которые обеспечивают удельные выбросы по фтору на обожжённых анодах 0,5 кг/т алюминия-сырца, а с использованием технологии Содерберга соответственно – 0,85 кг/т.

Третье направление, которое может и должно решить проблему экологической безопасности производства первичного алюминия, – это разработка принципиально иной технологии его восстановления из окислов. Из-за высокой стоимости материалов и оборудования такие технологии существуют пока лишь в лабораторных условиях. Однако поиск продолжается, и есть полная уверенность в том, что электролизу  $Al_2O_3$  с применением каменного угля (нефтекокса), фторсодержащих солей и использованием колоссального количества электроэнергии в недалеком будущем появится альтернатива.

Сейчас в мире около 50% первичного алюминия производится на электроэнергии, вырабатываемой гидростанциями (таблица) [5]. Это не только дешёвые источники энергии (по прямым затратам на её производство), но и экологически менее вредные, чем, например, ТЭЦ.

Россия – одна из стран с высоким потенциалом гидроэлектроэнергии, обусловленным наличием ряда крупных ГЭС, три из которых – Братская, Усть-Илимская и Иркутская расположены на территории Иркутской области. Это явилось важной предпосылкой строительства на территории области нового алюминиевого завода, для размещения которого из различных соображений первоначально были предложены 11 вариантов возможных площадок. После детального проведения для каждого намечаемого варианта комплексных инженерных изысканий, технико-экономической оценки, рассмотрения климатического потенциала, степени существующей антропогенной нагрузки были рекомендованы для строительства две альтернативные площадки в районе г. Тайшета. Согласно требованиям

законодательства РФ, международных конвенций и договоров, ратифицированных РФ для обеих площадок, представлены документы (материалы ОВОС), обобщающие результаты исследований по оценке воздействия на окружающую среду и здоровье населения намечаемой деятельности. Местоположение первой альтернативной площадки (первый проект, 2000 г.) предполагалось в 4 км к северо-востоку от Тайшета. Вторая площадка (второй проект, 2004 г.) – в 3 км к юго-западу от границы селитебной зоны города. Учитывая, что в районе преобладают западный (41–43%), юго-западный (9 – 17%) и юго-восточный (12 – 13%) переносы воздушных масс, первый проект, по нашему мнению, более благоприятен с точки зрения воздействия на состояние окружающей среды города, в частности, на атмосферный воздух, так как выбросы при реализации данного проекта имеют меньшую вероятность попадания в жилую зону города. Ниже мы подтвердим это результатами обработки данных многолетних метеорологических наблюдений.

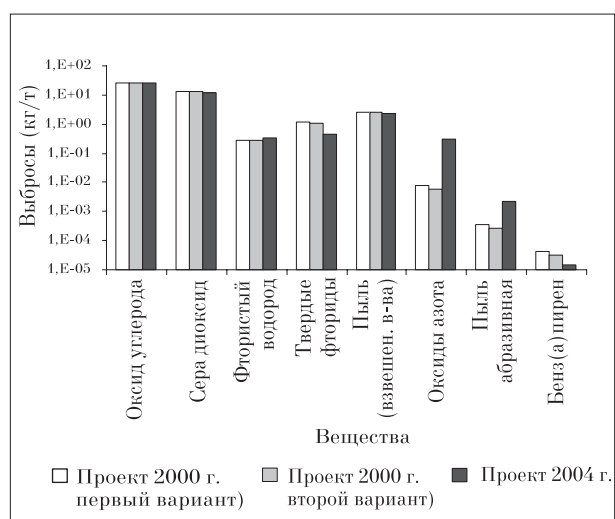
Первый проект предусматривал два альтернативных варианта по мощности проектируемого завода: для варианта 1 – 225 тыс. т/год, варианта 2 – 300 тыс. т/год.

Второй проект альтернативных вариантов не предлагал, утверждая проектную мощность 600 тыс. т/год. Кроме того, в этом проекте ещё дополнительно намечалось производство обожжённых анодов мощностью 350 тыс. т/год. Однако, несмотря на увеличение проектной мощности, сила тока электролизеров возрастает на 1/3 и на 1/7 в сравнении соответственно с вариантами 1 и 2 первого проекта.

С увеличением силы тока электролизеров удельный расход электроэнергии при производстве алюминия снижается, наблюдается также тенденция к снижению расхода анодной массы и фтористых солей [6]. Это приводит как к уменьшению себестоимости тонны алюминия (проект 2004 г.), так и снижению эмиссии загрязняющих веществ. Более того,

в обоих проектах предполагается установка электролизеров с обожжёнными анодами, что сводит к минимуму выбросы летучих органических веществ и снизит поступление в окружающую среду других загрязнителей, включая соединения фтора. Однако, несмотря на снижение производственных затрат и уменьшение удельных выбросов загрязняющих веществ при производстве 1 тонны алюминия, из-за увеличения мощности завода по второму проекту валовые выбросы некоторых ингредиентов возрастают на несколько порядков (рис. 2).

Согласно требованиям «Оценки воздействия намечаемой хозяйственной деятельности на окружающую среду» (ОВОС) по нормативной методике ОНД-86 (по программе УПРЗА «Эколог – ПРО») для каждого из названных проектов была проведена предварительная оценка потенциальных абсолютных концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах планируемых предприятий для условий полной загрузки и нормальной работы основного технологического и газоочистного оборудования. Однако необходимо отметить, что названная методика, сыграв в своё время положительную роль (позволила перейти от качественного описания к количественным оценкам степени загрязнения атмосферы), в настоящее время и «морально», и «физически» устарела, поскольку, во-первых, ОНД-86 грубо упрощает реальные физические процессы, параметризуя их отдельными коэффициентами, и, во-вторых, не учитывает климатические



**Рис. 2.** Удельные выбросы загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу от стационарных источников нового алюминиевого завода в г. Тайшет. 1 – проект 2000 г. (вариант 1), 2 – проект 2000 г. (вариант 2), 3 – проект 2004 г.

особенности местности, направление ветров, неоднородности рельефа, стратификацию атмосферы, спектр и скорость гравитационного осаждения частиц и пр. Расчёты ведутся для некоторого мгновенного значения модуля скорости ветра по круговой диаграмме с заданным шагом, что приводит к симметричности полученных результатов по секторам. И это особенно наглядно проявляется при расчётах выбросов от одиночного источника. Поэтому адекватность получаемых результатов можно оценивать с большой долей условности только лишь для ситуаций, близких к штилевым.

Нами были детально проанализированы многолетние данные восьмисрочных метеорологических наблюдений по месяцам-представителям года: январь, апрель, июнь. Исследуемые ряды многолетних наблюдений по каждому месяцу имели коэффициенты вариации, не превышающие 23%, что говорит об их относительно хорошей однородности. Обоснуем выбор месяцев-представителей года. Январь – самый холодный месяц с антициклональным типом погоды, который характеризуется повышенным атмосферным давлением, большой повторяемостью туманов (в отдельные годы – до 30%), штилей и слабых ветров (от 40 до 60%), нисходящими движениями воздуха, мощными приземными и приподнятыми инверсиями. Антропогенная примесь, выбрасываемая в атмосферу, в основном концентрируется вблизи своих источников. В апреле циклоническая деятельность атмосферы заметно усиливается, что способствует её очищению, особенно в дневные часы. В этом месяце фактически не бывает туманов (за 10 летний отрезок наблюдений нет ни одного дня), повторяемость штилей и слабых ветров уменьшается в 2-3 раза по сравнению с январем, а количество дней с абсолютной скоростью ветра более 6 м/с колеблется в пределах 16-18. В июне почти нет туманных дней (максимальное количество – 1 день), повторяемость слабых ветров колеблется в пределах 30-45%, а ветров более 6 м/с – до 20%. Учитывая, что в этом месяце предприятия теплоэнергетики работают с наименьшей интенсивностью, фоновое загрязнение атмосферы, по отношению к планируемой нагрузке от алюминиевого завода, значительно сокращается.

Для предварительной количественной оценки возможностей атмосферы к рассеянию поступающих в неё антропогенных примесей нами были рассчитаны климатические эллипсы рассеяния и метеорологический потенци-

ал атмосферы (МПА) [7], который определяется как отношение величин, способствующих накоплению примесей (повторяемость штилей и туманов), к величинам, обуславливающим рассеяние примесей (повторяемость осадков более 0,5 мм и ветров более 6 м/с). Анализируя построенные климатические эллипсы рассеяния, можно утверждать, что селитебную зону города антропогенные выбросы в больших количествах будут достигать от источников второго проекта.

Величины МПА для Тайшета составляют для января, апреля, июня соответственно 0,85; 0,35; 0,55. Используя принятую градацию, можно утверждать, что в январе примерно с равной частотой проявляются метеорологические процессы, способствующие рассеянию и накоплению примесей, а в апреле и июне соответственно существенно преобладают процессы, способствующие рассеянию примесей. Таким образом, в целом климатические условия в районе Тайшета способствуют рассеянию атмосферных примесей.

Известно, что оценка воздействия на окружающую среду при разработке проектной и проектной документации должна выполняться всеми альтернативными методами, чтобы была возможность предвидеть социальные и экономические последствия, принять своевременно правильные или оптимальные управленческие решения. Поэтому, не затрагивая вопросов уже существующего загрязнения в Тайшете от различных антропогенных источников, по авторским математическим моделям [8 – 9] мы оценили экологическую обстановку, которая имела бы место, если бы работали только источники алюминиевого завода при осуществлении первого проекта в режиме вариант 2 (с большей мощностью завода по алюминию-сырцу).

Следует отметить, что как стандартные методики, так и расчёты многих авторов ориентированы в основном на определение абсолютных концентраций ингредиентов при мгновенных параметрах среды, выбранных из каких-то соображений (например, наиболее часто повторяемая ситуация; некоторые средние характеристики среды; комплекс неблагоприятных метеорологических условий; метеорологические условия, способствующие загрязнению интересуемого района, и пр.). Тем не менее для многих практических задач интерес представляют не только абсолютные концентрации загрязняющих веществ, но

и долговременность их воздействия на окружающую среду, которая позволяет оценить степень соответствия экологической выносливости определённой территории к антропогенному воздействию, разработать оптимальную стратегию устойчивого развития. Поэтому важно рассматривать не только отдельные гидрометеорологические параметры среды интересуемого района, но и в целом его климатические особенности, формирующие условия для накопления или рассеяния примесей.

В данной работе использованы авторские модели, учитывающие климатические особенности рассматриваемой территории через многомерную функцию плотности распределения вероятностей реализации полной группы метеорологических параметров среды, имевших место за многолетний период наблюдений. Обоснованность такого подхода базируется на том, что перестройка циркуляций (момент наблюдений) происходит за период намного короче времени существования определённого типа движений (период между наблюдениями). Так как реализации относятся к разным годам, то их можно считать статистически независимыми. Это даёт возможность преодолеть трудности, связанные с неэргодичностью природных явлений, позволяя производить усреднение не по времени, а по реализациям. Таким образом, срочные наблюдения на гидрометеостанциях выступают как возможные реализации случайной функции, а многолетние наблюдения – как множество или ансамбль всех реализаций этой случайной функции. Поэтому можно рассматривать случайную последовательность состояний с независимыми приращениями как Марковский процесс без последствий.

Расчёты проведены с шагом от 100 до 500 м почти для 40 загрязняющих ингредиентов. Интерполяция значений компонентов вектора скорости ветра с пункта наблюдений в узлы регулярной сетки осуществлялась широко используемым в метеорологии методом оптимальной интерполяции. При этом ошибка оптимальной интерполяции не превосходила дисперсии случайной функции в предположении, что ошибки измерений не коррелируют между собой в различных сечениях и не коррелируют с истинными значениями функции [10].

Модель базируется на втором уравнении Колмогорова

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

которое авторы записывают в фазовой координате концентрации  $s$ .

Здесь  $p=p(t,s)$  – дифференциальный закон распределения величины  $s$ ,

$$A = \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \text{ и } B = \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{s^2}}{\partial t} \text{ – соответственно}$$

средняя скорость изменения средней концентрации и интенсивность колебаний около этой средней в интервале времени  $t \in [0, T]$ . В уравнении (1) неизвестными являются  $p, A, B$ .

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

Граничные условия

$$\frac{\partial(Bp)}{\partial s} - Ap = 0 \text{ при } s \rightarrow \infty,$$

$$\text{и } \int_0^{\infty} p(t,s) ds = 1 \quad (2)$$

Вопросы разрешимости (1) – (2) при определённых ограничениях на коэффициенты и рассмотрены А.Н. Колмогоровым в 1938 г. [8].

Замыкание уравнения (1) проводится с помощью уравнения переноса и турбулентной диффузии пассивной примеси, обладающей собственной гравитационной скоростью в анизотропной среде

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial u_i s}{\partial x_i} - \frac{\partial w_g s}{\partial x_3} + \alpha s = F + \frac{\partial}{\partial x_i} k_{ij} \frac{\partial s}{\partial x_j} \quad (3)$$

а также с использованием дифференциального закона плотности вероятности распределения многолетних метеорологических данных стационарных постов наблюдения.

В уравнении (3)  $i, j = 1, 3$  – номер координаты;  $t$  – время;  $u_i$  – компонента скорости среды по соответствующей координате  $x_i$ ;  $s$  – концентрация загрязняющей субстанции;  $\alpha$  – коэффициент неконсервативности примеси;  $F=F(t, x_i)$  – функция, описывающая источники рассматриваемой субстанции;  $k_{ij}$  – тензор коэффициентов турбулентной диффузии. Уравнение записано в тензорном виде, а потому по дважды повторяющимся индексам в одночленном выражении производится суммирование в пределах их изменения. При этом рассматривают как сумму средних и отклонений от них, т. е.  $s=\bar{s}+s'$ ;  $u=\bar{u}+u'$ ;  $k_{ij}=\bar{k}_{ij}+k'_{ij}$ ;  $F=\bar{F}+F'$ .

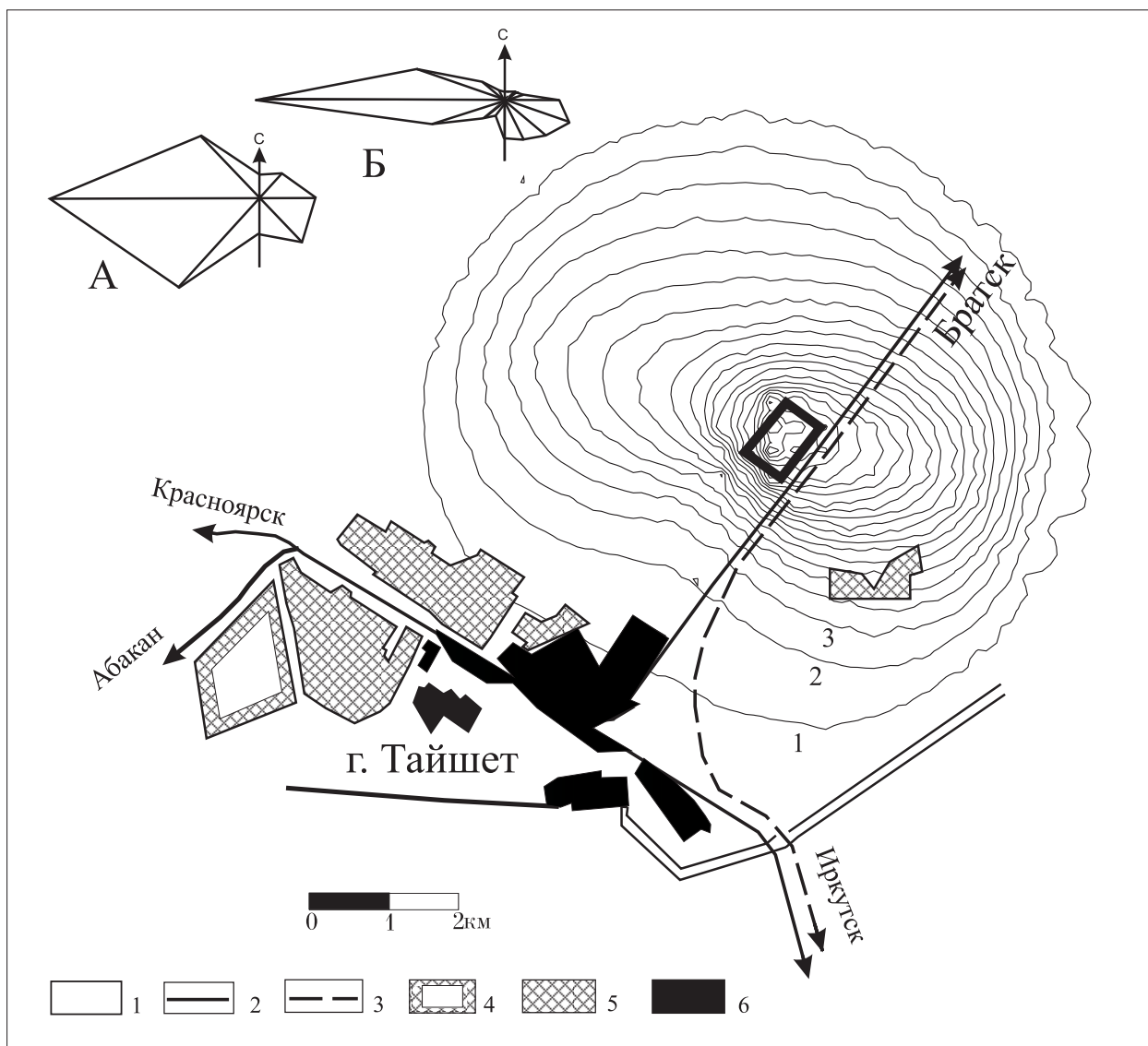
В качестве входной информации служат детальные параметры источников, спектральный показатель твёрдых частиц, многолетние восьмисрочные данные гидрометеорологических наблюдений, данные аэрологических наблюдений. Модель позволяет учитывать флуктуации как метеорологических параметров, так и работы источников выброса ингредиентов в окружающую среду.

На основании полученных результатов местность дифференцирована по степени опасности загрязнения (превышения ПДК). Приведём фрагменты результатов расчётов только для января. По таким ингредиентам, как, например, свинец, серная кислота, ацетон, едкий натр, ксилон, мазут, пыль древесная, угольная и металлическая, оксиды магния, азота, серы и углерода, почти нет превышений ПДК (не более 35 – 40 ч. в месяц в окрестности рабочей зоны), что в основном не противоречит расчётам по ОНД-86. По остальным ингредиентам расчёты по предлагаемой модели резко расходятся с расчётами по ОНД-86. Так, по оксиду алюминия в течение всего месяца (744 ч.) будет не только превышение 1 ПДК 0,01 мг/м<sup>3</sup> (рис. 3) в радиусе 6 – 7 км от источников выброса, но и непосредственно в рабочей зоне – 10-30-кратное превышение ПДК (т. е. будет превышение и максимальной разовой ПДК 0,1 мг/м<sup>3</sup>). По твёрдым фторидам в течение всего месяца превышение 1 ПДК 0,03 мг/м<sup>3</sup> и 10 ПДК в радиусе 3 км и 500 м соответственно; по фтористому водороду и бенз(а)пирену превышения 1 ПДК 0,005 мг/м<sup>3</sup> и 10<sup>-6</sup> мг/м<sup>3</sup> соответственно – около 500 ч. в месяц в радиусе 1,5 – 2 км, а 10 ПДК – не более 40 ч. в радиусе 200 – 300 м (рис. 3)

Расчёты в основном проводились в сравнении со средними суточными ПДК (ПДК<sub>сс</sub>), которые, с нашей точки зрения, являются более репрезентативными показателями для населённых мест и растительности, и только в случае отсутствия ПДК<sub>сс</sub> в расчёты вводились или максимальные разовые ПДК, или ОБУВ – ориентировочно безопасные уровни воздействия.

## Заключение

Предлагаемая математическая модель позволяет учитывать климатические особенности местности; флуктуации метеорологических характеристик и интенсивность источников выброса загрязняющих веществ; неравномерность работы предприятий; спектральную плотность частиц, от которой зависит



**Рис. 3.** Частота превышения 1 ПДК = 0,01 мг/м<sup>3</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в январе. Изолиния 1 оконтуривает область с превышением 24 ч. в месяц, изолиния 2 – 48 ч. и так далее – с шагом 24 ч.; А – годовая роза ветров (по 8 румбам), Б – роза ветров в январе (по 16 румбам); 1 – площадка алюминиевого завода, 2 – проектируемый железнодорожный путь, 3 – проектируемая автомобильная дорога, 4 – перспективная жилая застройка, 5 – существующая жилая застройка, 6 – существующие промышленные предприятия

скорость их гравитационного осаждения; неоднородности подстилающей поверхности, обусловленные её рельефом и перепадом температур «вода – суша».

Модель работает в режиме диагностирования и прогнозирования и прошла успешную апробацию на различных промышленных российских и зарубежных объектах, зачастую вступая в полное противоречие с результатами расчётов по методике ОНД-86.

Учитывая, что предприятия алюминиевой промышленности (в силу специфических выбросов) относят к особо опасным производствам, необходимо уже на этапе проектирования выполнить тщательный прогноз потенциальных последствий их влияния на окружа-

ющую среду, используя при выполнении ОВОС не только стандартные, но и альтернативные методы, с целью минимизации отрицательных последствий.

Работа выполнена при поддержке программ «Фундаментальные исследования и высшее образование» (проект НОЦ-017 «Байкал») и «Развитие научного потенциала высшей школы (2006 – 2008 гг.)» (проект РНП.2.2.1.1.7334).

### Литература

1. Терентьев В.Г., Школьников Р.М., Гринберг И.С., Черных А.Е., Зельберг Б.И., Чалых В.И. Производство алюминия. Иркутск: МАНЭБ, 2001. 350 с.

2. Буркат В.С., Друкарев В.А. Сокращение выбросов в атмосферу при производстве алюминия. СПб, 2005. 275 с.
3. Воробьев А.П. Изменение в структуре и динамике потребления алюминия на мировом рынке // Бюллетень иностранной коммерческой информации. 2004. № 109. С. 13-16.
4. Веселков В.В., Овченков В.Л., Щетников А.И. Модернизация действующего электролизного производства предприятий ОАО «СУАЛ» с целью сокращения выбросов загрязняющих веществ // Алюминий Сибири – 2005. Сб. докл. XI междунар. конф. Красноярск: «Бона компании», 2005. С. 264-272.
5. Прокопов И.В. Российская алюминиевая промышленность и некоторые современные тенденции развития мирового рынка алюминия // Режим доступа: [<http://www.alfametal.ru/?id=tendent>] (16 ноября 2005 г.).
6. Гринберг И.С., Громов Б.С., Рагозин Л.В., Школьников М.Р., Громов С.Б., Веселков В.В., Зельберг Б.И., Черных А.Е. Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе. С.-Пб.: МАНЭБ, 2005. 691 с.
7. Русанов Ю.В. Метеорологические условия загрязнения атмосферы над Томской областью // География и природные ресурсы. 1992. № 3. С. 60-65.
8. Аргучинцева А.В., Аргучинцев В.К., Батуринов В.А. и др. Моделирование и управление процессами регионального развития. М.: Физматлит, 2001. 431 с.
9. Аргучинцев В.К., Аргучинцева А.В. Модели и методы для решения задач охраны атмосферы, гидросферы и подстилающей поверхности. Иркутск: ИГУ, 2001. 114 с.
10. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерполяции метеорологических данных. Л.: Гидрометеоизд, 1976. 357 с.

УДК 570:628.35

### Использование бактериальной суспензии *Thiobacillus ferrooxidans* для очистки сточных вод

К.А. Таскараева, А.У. Исаева, В.К. Бишимбаев  
Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова

В сточных водах ряда предприятий ЮКО степень очистки составляет в среднем по содержанию взвешенных веществ 24,1%, сухого остатка 19,4%, фосфатов 42,1%, хлоридов 40,2%, а нефтепродуктов 100%. Бактериальная суспензия раствор *Thiobacillus ferrooxidans* перспективно использовать в качестве коагулянта для очистки сточных вод химической, нефтехимической и фармацевтической промышленности.

In South Kazakhstan Region in sewage of some plants the degree of cleaning on average reaches 24,1% of respirable particles, 19,4% of solid residue, 42,1% of phosphates, 100% of oil. Bacterial suspension *Thiobacillus ferrooxidans* can be used in perspective as coagulant for the sewage purification in chemical, oil-chemical and pharmaceutical industry.

Ключевые слова: серобактерии, биоочистка, коагулянты

Образование значительных количеств сточных вод в республике Казахстан, загрязнённых различными химическими веществами, повышение требований к качеству очищенных сточных вод обуславливают применение разнообразных методов их очистки. В промышленных и городских очистных сооружениях для очистки сточных вод широко применяются известные методы, согласно которым для очистки сточных вод используются биофильтры первой и второй ступени, введение источника сульфид-ионов в виде солей сероводородной кислоты и для очистки от неорганических соединений, поступающих в аэротенк, в виде биостимулятора вводят раствор фталоилжелатина [1]. Одна-

ко вышеперечисленные методы очистки обладают рядом существенных недостатков, а именно: требуется относительно длительное время, значительные эксплуатационные затраты.

В последнее время для осаждения различных примесей используются коагулянты. Метод очистки сточных вод осаждением загрязняющих примесей в виде труднорастворимых соединений является одним из основных, применяемых на производствах [2]. В качестве альтернативы эффективно использование биотехнологических методов очистки. Так, культуральную жидкость бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* можно использовать как коагулянт для очистки сточных вод предприятий от ионов металлов и некоторых