

3. *Невровский В.А.* // Науч. тр. МАТИ. 2004. № 7(79). С. 112.
4. *Марутьян С.В., Марутьян С.С., Невровский В.А.* // Технол. машиностроения. 2007. № 11. С. 23.
5. *Рябов В.Р.* Алюминирование стали. М.: Металлургия, 1975.
6. *Марутьян С.В.* // Сб. докл. 3-й Всерос. науч.-техн. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, дек. 2004 г.). М.: МАТИ, 2004. С. 100.
7. *Марутьян С.В., Марутьян С.С., Невровский В.А.* // Сб. докл. 8-й Всерос. науч.-техн. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, ноябрь 2009 г.). М.: МАТИ, 2009. С. 85.
8. *Проскуркин Е.В., Попович В.А., Мороз А.Г.* Цинкование. М.: Металлургия, 1988.
9. *Невровский В.А., Канцырев А.В., Марутьян С.С., Чуриков Г.Е.* // Сб. докл. 3-й Всерос. науч.-техн. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, дек. 2004 г.). М.: МАТИ, 2004. С. 107.
10. *Васильев М.Б., Марутьян С.В., Марутьян С.С., Невровский В.А.* // Сб. докл. VI Всерос. науч.-техн. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, ноябрь, 2007 г.). М.: МАТИ, 2007. С. 6.
11. *Канцырев А.В., Марутьян С.С., Невровский В.А., Петров П.Н.* // Сб. докл. 2-й Всерос. науч.-техн. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, дек. 2003 г.). М.: МАТИ, 2003. С. 168.
12. *Канцырев А.В., Марутьян С.В., Марутьян С.С., Невровский В.А.* // Сб. докл. VI Всерос. науч.-техн. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, ноябрь 2007 г.). М.: МАТИ, 2007. С. 99.
13. *Канцырев А.В., Васильев М.Б., Петров П.Н.* // Науч. тр. МАТИ. 2007. № 13 (85). С. 67.

УДК 87.17

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ВЫБРОСОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА В АТМОСФЕРЕ И АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ БАЙКАЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА

© 2014 г. **Н.И. Янченко, А.Н. Баранов, О.Л. Яскина**

Иркутский государственный технический университет (ИрГТУ)

Братский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (БЦГМС)

Статья поступила в редакцию 09.08.12 г., доработана 27.08.13 г., подписана в печать 30.08.13 г.

Рассмотрено распределение фтора и серы в технологии производства первичного алюминия, атмосфере и атмосферных осадках в районе г. Братска. Установлено, что содержание HF и SO<sub>2</sub> в атмосфере уменьшается при увеличении количества осадков. Впервые определены фактические концентрации фтора во всех суточных пробах осадков дождя и снега в зоне влияния выбросов промышленной площадки Братска и выявлены влияющие на них показатели (температура приземного слоя воздуха, интенсивность атмосферных осадков). Характеристики распределения компонентов выбросов в атмосферных осадках позволяют использовать их для экологической оценки состояния атмосферного воздуха и установления корреляционных связей с технологическими параметрами.

**Ключевые слова:** производство первичного алюминия, экологическая безопасность, выбросы фтора, диоксид серы, интенсивность атмосферных осадков.

**Янченко Н.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры общеобразовательных дисциплин ИрГТУ (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83). Тел.: (3952) 40-52-65. E-mail: fduesn@bk.ru.

**Баранов А.Н.** – докт. техн. наук, профессор кафедры металлургии цветных металлов ИрГТУ. Тел.: (3952) 40-52-65. E-mail: Baranov@istu.edu.

**Яскина О.Л.** – вед. инженер, аэрохимик БЦГМС (665702, Иркутская обл., г. Братск, ул. Набережная, 74). E-mail: olgyaskina@yandex.ru.

Fluorine and sulfur distribution in primary aluminum, the atmosphere, and atmosphere precipitation in the region of Bratsk city is considered. HF and SO<sub>2</sub> contents in the atmosphere are found to be reduced when the amount of precipitations increases. For the first time, actual fluorine densities in all daily samples of rain and snow precipitations in the zone of the effect of emissions at the Bratsk industrial platform are determined and the indices affecting them (ground air layer temperature, intensity of the atmosphere precipitation) are found. The performances of emission component distribution in the atmosphere precipitation allow us to use them for the ecological estimation of the ambient air and determination of the correlation with the process parameters.

**Key words:** primary aluminum production, environmental safety, fluorine emissions, sulfur dioxide, intensity of atmosphere precipitation.

## ВВЕДЕНИЕ

В Байкальском регионе основными антропогенными источниками выбросов фтора являются производства первичного алюминия, ферросплавов, гексафторида урана, предприятия теплоэнергетики. Здесь расположены Братский (БрАЗ) и Иркутский (ИрКАЗ, г. Шелехов) алюминиевые заводы, которыми в 2010 г. произведено ~1,36 млн т первичного алюминия, или 3,4 % от его мирового производства. Строятся новые алюминиевые заводы в г. Тайшет (Иркутская обл.) и п. Богучаны (Красноярский кр.) проектной мощностью ~1,3 млн т/год.

Город Братск (рис. 1) на протяжении многих лет входит в приоритетный список городов РФ, имеющих комплексный показатель загрязнения воздуха — индекс загрязнения атмосферы (ИЗА)  $\geq 14$ . Для Братска ИЗА колеблется от 34 до 44 [1]. В разные годы в этот список включали и г. Шелехов. Установлено [2], что уровень заболеваемости болезнями костно-мышечной системы у населения Братска на 43,8 % выше, чем у других жителей Иркутской об-

ласти. В связи с тем, что химический состав атмосферных осадков является индикатором состояния атмосферы и сопряженных сред (почва, растения и т.д.), проведено исследование распределения и поведения компонентов выбросов промышленных предприятий в атмосферных осадках.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были проведены систематический отбор проб влажных атмосферных выпадений (осадков дождя и снега), расчет материальных потоков элементов (фтора, серы, натрия) в технологии производства алюминия, ретроспективный анализ и интерпретация материалов Росгидромета о содержании в атмосфере г. Братска SO<sub>2</sub>, HF и интенсивности атмосферных осадков. Отбор проб атмосферных осадков выполнялся на метеоплощадке Братского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (БЦГМС) в п. Падун на расстоянии 26—27 км от БрАЗа в соответствии с руководящими документами Росгидромета. Плановыми работами БЦГМС в этих «суточных» пробах предусмотрен лишь оперативный химический контроль pH без измерения фтора и сульфат-иона. В аккредитованных лабораториях Братска и Иркутска для анализа отобранных проб были использованы такие методы, как фотометрический и спектральный с индуктивно-связанной плазмой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Распределение соединений серы в атмосфере, осадках дождя и снега в районе г. Братска.** В 2005 г. при применении содобикарбонатного способа очистки электролизных газов («мокрый» способ газоочистки) валовые выбросы диоксида серы на БрАЗе составили 2,377 тыс. т [3]. В 2012 г. выбросы SO<sub>2</sub> только от ТЭЦ-6 г. Братска оценивались в 2718,42 т, причем участок теплоисточников и тепловых сетей от ТЭЦ-6 дал 2078,83 т [3]. Интерпретируя данные



**Рис. 1.** Схема расположения городских поселков и основных промышленных источников загрязнения атмосферы в районе г. Братска

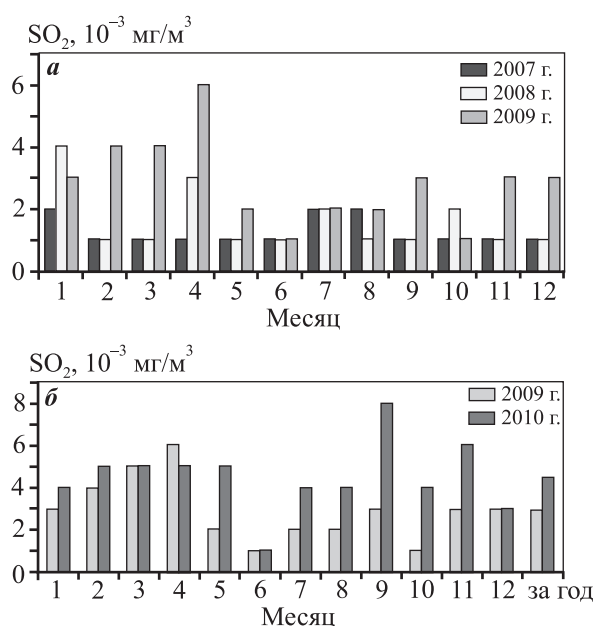


Рис. 2. Среднемесячное содержание SO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе в п. Чекановский (а) и п. Падун (б) в разные годы

БЦГМС, можно проанализировать динамику загрязнения атмосферы диоксидом серы (рис. 2) и сделать вывод, что содержание SO<sub>2</sub> в ней в п. Чекановский (3 км от БрАЗа, 4 км от завода ферросплавов) в течение года практически постоянно, без превышения предельно допустимой среднесуточной концентрации 0,05 мг/м<sup>3</sup>. В то же время в п. Падун (26–27 км от БрАЗа) концентрация SO<sub>2</sub> в летние месяцы несколько меньше, чем в холодный период года, что связано с сезонной работой ТЭЦ.

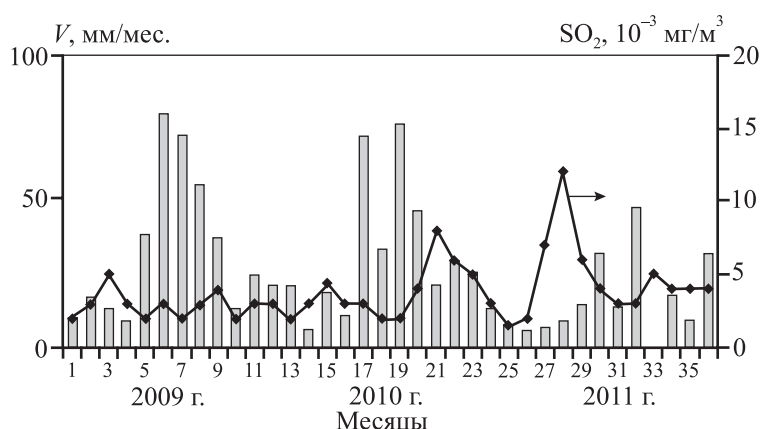
Известно, что на содержание некоторых газовых и аэрозольных примесей в атмосфере оказывает влияние количество осадков дождя и снега. На основании данных о суточной интенсивности осадков и содержании диоксида серы в атмосфере в день их выпадения, на рис. 3 представлена динамика этих показателей в 2009–2011 гг. (за 36 месяцев). Наиболее отчетливо тенденция «вымывания» диоксида серы из атмосферы отмечается в летние месяцы (см. рис. 3, месяцы 5–9, 17–20, 30–32), когда выпадает наибольшее количество осадков.

Известно, что в отличие от действующих алюминиевых заводов Байкальского региона строящиеся предприятия будут использовать «сухую» газоочистку электролизных газов с применением в качестве адсорбента глинозема. Такой способ удобен для удаления соединений фтора, но практически не эффективен в отношении SO<sub>2</sub> по сравнению с «мокрой» газоочисткой. В документах, обосновывающих строительство Богучанского алюминиевого завода [4], отмечено, что «остаточное воздействие на атмосферу значимых выбросов загрязняющих веществ проектируемого алюминиевого завода в виде удельных показателей выбросов для диоксида серы составит 13,7 кг/т<sub>Al</sub>». Простой расчет показывает, что с учетом проектной мощности выпуска алюминия этого предприятия (600 тыс. т/год) выбросы SO<sub>2</sub> составят 8,22 тыс. т, что в 3 раза выше, чем на БрАЗе (где производительность 1 млн т Al в год), т.е. загрязнение атмосферного воздуха, атмосферных осадков и сопряженных сред будет весьма значительным. Указано [4], что удельный выброс SO<sub>2</sub> соответствует отечественным и мировым стандартам алюминиевой промышленности. Однако единых мировых стандартов нет, а есть стандарты для развивающихся стран и т.д. Причем в странах ЕС нет предприятий производительностью 600 тыс. т Al в год. Высокая мощность выпуска алюминия заводов Байкальского региона обусловлена низкой стоимостью электроэнергии (несмотря на то, что основное алюминиевое сырье (глинозем) ввозится из-за рубежа) и близостью быстро развивающегося рынка потребления алюминия в Юго-Восточной Азии.

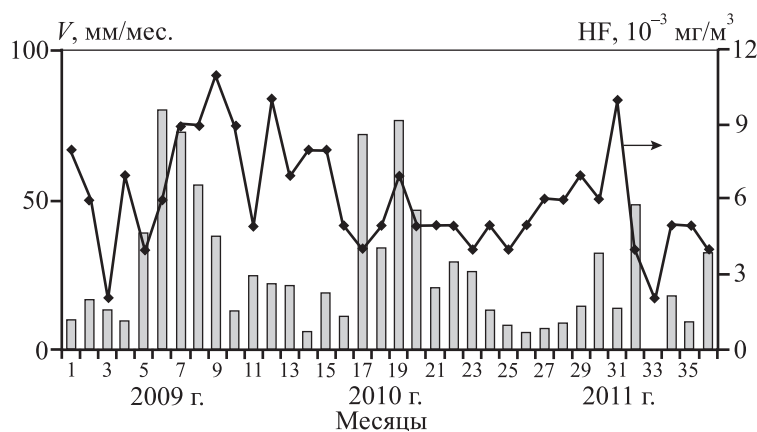
Распределение соединений фтора в атмосфере, осадках дождя и снега в районе г. Братска. С учетом предполагаемого расхода фтора 25 кг/т<sub>Al</sub> [5], например, в 2010 г. (при выпуске 1 млн т Al/год) «приход» фтора с сырьем для производства алюминия на БрАЗе составил 25 тыс. т. По данным о валовых выбросах [6], основанным в том числе и на расчетах [7], в атмосферу поступили 1471 т HF и 1979 т плохо растворимых фторидов. Таким образом, расчетное количество выбросов фтора составляет примерно 14 % от его «прихода».

Очищению воздуха от соединений фтора способствуют не только технологические решения, но и выпадение атмосферных осадков. При интерпретации данных о содержании HF в атмосфере, измеренных в дни выпадения осадков (24 км от БрАЗа), отмечено, что концентрация фтористого водорода в атмосфере уменьшается при увеличении количества осадков дождя и снега (на рис. 4 эта тенденция прослеживается для следующих из 36 месяцев 2009–2011 гг.: 3, 5–7, 17–20, 32 и 36)

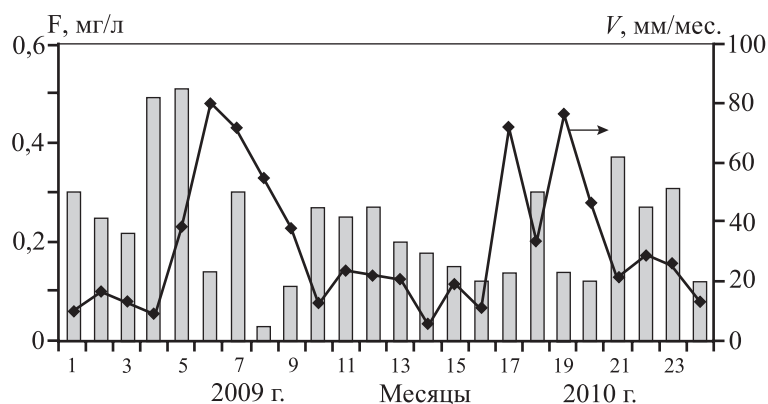
Соединения фтора из атмосферы попадают в атмосферную влагу (в том числе в осадки дождя и снега) и на подстилающие поверхности. По результатам анализа фтора в суточных пробах осадков установ-



**Рис. 3.** Динамика среднего содержания диоксида серы в атмосфере (по данным в дни выпадения осадков) в п. Падун и количества осадков дождя и снега (без учета иных влажных выпадений) по месяцам 2009—2011 гг.



**Рис. 4.** Динамика среднего содержания фтористого водорода в атмосфере (по данным в дни выпадения осадков) в п. Падун и количества осадков дождя и снега (без учета иных влажных выпадений) по месяцам 2009—2011 гг.

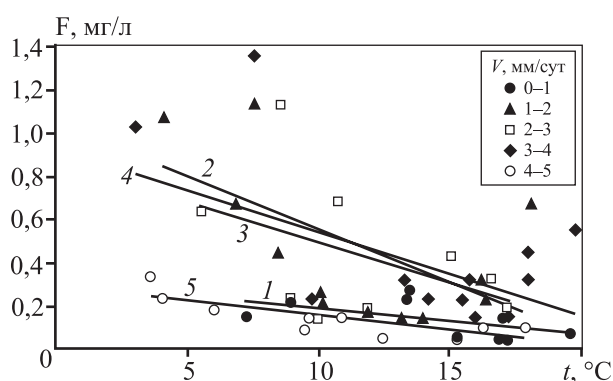


**Рис. 5.** Изменение во времени средневзвешенного содержания ионов фтора в осадках дождя и снега и количества осадков в г. Братске по месяцам 2009 и 2010 гг.

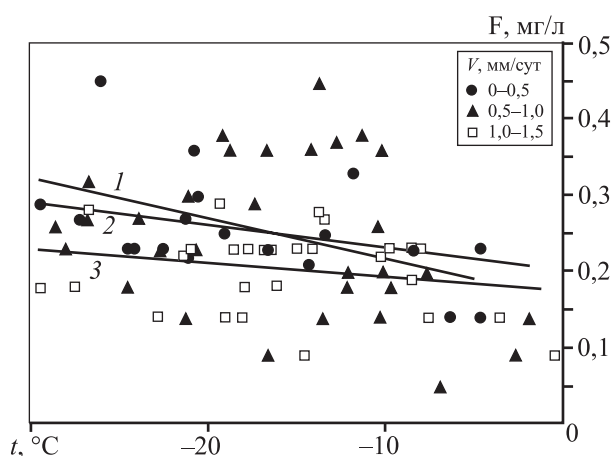
лено, что содержание в них ионов фтора уменьшается при увеличении интенсивности осадков, особенно в летнее время (рис. 5). Так, концентрация фтора во влажных атмосферных выпадениях г. Братска находится в интервале 0,05—1,2 мг/л, в большинстве проб — 0,10—0,30 мг/л. Подобная же тенденция снижения доли фтора в осадках с повышением их интенсивности отмечена и в г. Пекине [8], но в зимнее время, — содержание фтора в осадках там связано со сжиганием бурого угля и находится в интервале от 12 до 36 мг-экв./л, в 90 % проб — 19 мг-экв./л. В атмосферных осадках г. Шелехова содержание фтора в дожде составляет 19 %-экв. [9].

Установлена зависимость концентрации фтора в атмосферных осадках от приземной температуры для различных количеств осадков (0—1, 1—2, 2—3, 3—4, 4—5 мм/сут). Установлено, что при  $[F] > 0,3$  мг/л для интервалов 1—2, 2—3, 3—4 мм/сут наблюдается увеличение содержания F при уменьшении температуры (рис. 6) — возможно, это свидетельствует о том, что фториды в атмосферном воздухе находятся в газообразной форме. Такая зависимость отсутствует для осадков снега (рис. 7).

В осадках дождя (8 проб, отобранных на расстоянии 26—27 км от БрАЗа в 2009 и 2010 гг.) и снега (1 проба, 25 км от БрАЗа, 2010 г.) методами индуктивно-связанной плазмы выполнен анализ 62 элементов. Полученные концентрации сравнивали с содержаниями элементов в осадках станции мониторинга Лимнологического института СО РАН (расположенной в п. Монды на границе Иркутской области и Монголии), которые можно считать региональными фоновыми [10]. Превышение концентраций элементов над фоновыми значениями от 1 до 10 раз отмечено для следующих элементов: В, Na, Al, Si, V, Cr, Mn, Co, Ni, As, Rb, Sb, Cd, Pb; от 10 до 50 раз — для таких элементов, как Mg (12—30), K (5—25), Ca (12—25), Ti (3—38), Cu (9—19), Se(20), Ba (12—



**Рис. 6.** Зависимость концентрации фтора в атмосферных осадках дождя от температуры приземного слоя воздуха для различных суточных количеств осадков  
Цифрами обозначены линии регрессии для интервалов  $V$ , мм/сут: 1 — 0÷1; 2 — 1÷2; 3 — 2÷3; 4 — 3÷4; 5 — 4÷5



**Рис. 7.** Зависимость концентрации фтора в атмосферных осадках снега от температуры приземного слоя воздуха для различных суточных количеств осадков  
Цифрами обозначены линии регрессии для интервалов  $V$ , мм/сут: 1 — 0÷0,5; 2 — 0,5÷1,0; 3 — 1,0÷1,5

50); от 50 — для Zn (2—400) и Sr (2—80). Источником тяжелых металлов в осадках дождя, снега и свежевыпавшем снежном покрове, по-видимому, являются процессы горения углеводородного топлива и другие технологические процессы.

## ВЫВОДЫ

1. Оценочно установлено, что в атмосферу г. Братска поступает 14 % от «прихода» фтора на алюминиевый завод. Определено его фактическое содержание в суточных пробах атмосферных осадков. Показано, что доля фтора уменьшается при увеличении интенсивности осадков и повышении температуры приземного слоя воздуха.

2. Установлено, что в Братске содержание диокси-

да серы и фтористого водорода в атмосфере снижается при возрастании количества атмосферных осадков.

3. Полученные характеристики распределения соединений фтора и серы в технологиях производства, атмосфере и атмосферных осадках позволяют использовать их для экологической оценки состояния атмосферного воздуха и сопряженных сред и при сравнении с технологическими показателями (например, удельным расходом фтора и серы) применять их для управления экологической безопасностью производства алюминия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания 5.1678.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудринская Г.Б. Качество атмосферного воздуха на территории Иркутской области по результатам мониторинга Иркутского УГМС. <http://irkugms.ucoz.ru/publ/> (дата обращения 7 августа 2012 г.).
2. Савченков М.Ф., Юшков Н.Н., Горева Е.Л. и др. // Охрана окружающей среды в муниципальных образованиях на современном этапе. Братск: БрГТУ, 2002. С. 285.
3. Состояние загрязнения атмосферного воздуха городов на территории деятельности Иркутского УГМС в 2005 г.: Ежегодник. Иркутск: ФС РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды; Иркутское террит. упр-е по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2006.
4. Богучанский алюминиевый завод. Обоснование инвестиций строительства. Т. XI. Оценка воздействия на окружающую среду. Ч. 4 // Отчет ЗАО НПО «ДИЭМ», ООО «Русская инжиниринговая компания» (РУСАЛ РИК), ОАО «Всероссийский алюминиево-магний институт» (РУСАЛ ВАМИ), 2009.
5. Терентьев В.Г. Производство алюминия. М.: Металлургия, 1997.
6. О состоянии и охране окружающей среды Иркутской области в 2010 г. Иркутск: ООО «Форвард», 2011.
7. Расчетная инструкция (методика) по определению состава и количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при электролитическом производстве алюминия: Утв. приказом ФС Ростехнадзора № 182 от 31.03.2005 г.
8. Feng Y.W., Ogura N., Feng Z.W. et al. // Water, Air, Soil Pollut. 2003. Vol. 145. P. 95.
9. О состоянии и охране окружающей среды Иркутской области в 2003 г. Иркутск: Облмашинформ, 2004.
10. Онищук Н.А., Ходжер Т.В. // Оптика атмосферы и океана. 2009. № 6. С. 579.