

УДК 504.3.054.001.57 + 504.054 + 504.73.054

Влияние атмосферного загрязнения на экосистемы Нерюнгринского топливно-энергетического комплекса (Якутия)

С. Ю. АРТАМОНОВА¹, Ю. П. КОЛМОГОРОВ¹, В. Ф. РАПУТА², Т. В. ЯРОСЛАВЦЕВА²

¹Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии им. А. А. Трофимука
Сибирского отделения РАН, проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: artam@uiggm.nsc.ru

²Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск 630090 (Россия)

Аннотация

Рассмотрено атмосферное загрязнение экосистем в районе Нерюнгринского топливно-энергетического комплекса (НТЭК). Проведено математическое моделирование процессов аэрозольного переноса пыли, SO₂, NO₂ методом постановки прямой и обратной задач. Путем сопоставления вычисленных и экспериментально измеренных данных (в 22 точках) запыленности снежного покрова выбрана адекватная модель, в которой выделены зоны с разной степенью атмосферной загрязненности. Проведен корреляционный анализ изменения химического состава верхних горизонтов почвенного покрова и тканей лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.) в зависимости от степени атмосферной запыленности. Выявлено, что с усилением атмосферного загрязнения в тканях лиственницы повышаются концентрации тяжелых металлов – Fe, V, Ni, Cu, Zn, Ga, Mo, Pb. Коэффициент корреляции в хвойных узлах не ниже 0,8, тогда как в почвах подобная высокая корреляция не наблюдается. Установлена обратная корреляция у биофильного Mn: чем загрязненнее среда, тем меньше его содержание в тканях лиственницы. В органах лиственницы накопление тяжелых металлов растет в ряду молодые побеги – хвоя – почки.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение техногенного загрязнения и реакции на него живой составляющей экосистем – одна из наиболее актуальных проблем геоэкологии. Исследование атмосферного загрязнения затруднено из-за высокой подвижности воздушных масс, наложения шлейфов от локальных, региональных и глобальных источников.

Для корректного изучения системы атмосферное загрязнение – реакция экосистем выбран объект с ограниченным числом стационарных источников загрязнения при отсутствии в радиусе ~1000 км других загрязнителей, среди девственных таежных экосистем Южной Якутии. Цель исследований – выявить особенности влияния атмосферного загрязнения угледобывающей и топливно-энергетической промышленности Нерюнгринского ТЭК на таежные экосистемы. Комплексные

эколого-геохимические исследования проведены в 2002–2003 гг. Нерюнгринский ТЭК ограничен в пределах четырехугольника площадью ~71,5 тыс. га с географическими координатами углов: долгота 124° 20', широта 56° 00' – долгота 125° 30', широта 56° 00'; долгота 124° 20', широта 57° 10' – долгота 125° 30', широта 57° 10'.

Расположение рассматриваемого района на стыке двух климатических областей (континентальной восточно-сибирской и муссонной дальневосточной) предопределяет особенности климата. В среднемноголетней и среднезимней розе приземных ветров преобладает северо-западное направление, среднегодовая скорость составляет ~2,4 м/с. В пограничном слое атмосферы (500–1000 м) увеличивается скорость ветра (среднегодовая составляет 9 м/с), в розе ветров преобладают северные направления [1, 2].

Изучаемая территория представляет собой район сплошной и прерывистой многолетней мерзлоты. Распространены следующие типы почв: подзолы горные и подбуры таежные типичные и оподзоленные на терригенных породах, дерново-карбонатные – на карбонатных. Развиты экосистемы высотно-поясного типа от горно-таежных до горно-тундровых с преобладанием лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.), ерников (*Betula divaricata*) и кустарничковых растений (*Vaccinium* sp.) [3].

Промышленное освоение территории Нерюнгри началось с разработки угольного месторождения в 1975 г. Нерюнгринский угольный разрез занимает площадь ~4.4 тыс. га, около 60 % от площади занимают отвалы пустых пород, которые сформированы по внешнему краю карьера в два яруса высотой около 70 и 30 м. Общий объем отвалов в августе 2002 г. составил 1 231 859 тыс. м³. Взрывные работы ведутся на карьере регулярно, ежегодно используется до 30 тыс. т взрывчатки, взрывается до 42 тыс. м³ горной массы. На обогатительной фабрике, расположенной на промышленной территории угольного разреза, проводится разделение углей на коксующиеся и энергетические. В среднем в год перерабатывается до ~5 млн т коксующихся и 1.7 млн т энергетических углей. Основным источником выбросов фабрики – сушильно-растопочный цех (высота трубы котельной составляет 62 м).

Энергетические угли являются основным топливом Нерюнгринской ГРЭС – поставщика электроэнергии на промышленные объекты Якутии и Амурской области. Высота трубы НГРЭС 236.4 м, диаметр 8.4 м. Нерюн-

ринская водогрейная котельная (высота трубы 150 м, диаметр 4.8 м), Чульманская ТЭЦ (высота трубы 60 м, диаметр 4.3 м) построены для теплового снабжения города Нерюнгри и пос. Чульман. Основные параметры объектов Нерюнгринской ТЭК приведены в табл. 1.

Южно-Якутская автомагистраль и ветка Амуро-Якутской железной дороги представляют собой линейные объекты, влияющие на узкую полосу земли на всем их протяжении. На локальных участках речных долин ведется золотодобыча гравитационным методом. Из-за малонаселенности Нерюнгринского улуса (по данным 2002 г., 72.6 тыс. человек на 98.9 тыс. км², или 0.7 человек на 1 км², 98.3 % населения составляют жители г. Нерюнгри и пос. Чульман) антропогенный прессинг на экосистемы оценивается как незначительный. Следовательно, основными источниками техногенного воздействия на обширные таежные экосистемы района являются объекты Нерюнгринского ТЭК.

Удаленность территории на тысячи километров от других промышленных регионов, однотипный вид техногенного воздействия на экосистемы, короткая история промышленного развития и наличие необходимых метеоданных позволили с помощью метода математического моделирования получить адекватную количественную модель загрязнения района, апробированную экспериментально.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Математическое моделирование постановкой прямой задачи проведено на основе ме-

ТАБЛИЦА 1

Характеристика объектов Нерюнгринского топливно-энергетического комплекса (по данным Нерюнгринского управления охраны природы)

Объект	Расход топлива в 1996–2001 гг., т/год		Выбросы в атмосферу, т/год	
	Уголь	Мазут	2000 г.	2001 г.
Нерюнгринский угольный разрез	–	–	1922*	1857*
Обогатительная фабрика	73 800**	1200**	1876	1884
Нерюнгринская ГРЭС	1 196 822	83.85	10 711	11 826
Нерюнгринская водогрейная котельная	39 920	3	1661	1113
Чульманская ТЭЦ	130 864	9	1776	1412

* Расчетные данные без учета выбросов при взрывных работах.

** Данные отдела экологии обогатительной фабрики Нерюнгринского угольного разреза.

тодики ОНД-86, разработанной в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (С.-Петербург) [4-6]. Концентрация вещества в приземном слое атмосферы $C(r, \varphi)$ (в $\text{мг}/\text{м}^3$) от точечного источника рассчитывалась в каждой точке полигона по формуле

$$C(r, \varphi) = c'(r, u_1, k_1) \times \exp[-(\varphi - \varphi_0)^2 / (2\varphi_0^2)] / (2\pi^{1/2} \varphi_0 r)$$

где u_1 и k_1 – скорость ветра и коэффициент вертикального обмена в приземном слое атмосферы на высоте z_1 (обычно 1 м) соответственно, φ_0 – дисперсия флуктуаций направления ветра за 20–30 мин, φ – азимут оси факела, r – расстояние от источника, c' – концентрация от бесконечного линейного источника, ориентированного перпендикулярно направлению ветра, с удельной мощностью на единицу длины, равной мощности рассматриваемого точечного источника. Значение c' определяется с помощью решения уравнения атмосферной диффузии.

При моделировании рассмотрены варианты с учетом двух роз приземных ветров на метеостанции в пос. Чульман по многолетним (1966–1980 гг.) и краткосрочным (1996–1998 гг.) данным. Для пограничного слоя атмосферы на высоте с 500 до 1000 м учтена роза ветров, полученная в результате высотного зондирования [1, 2].

Математическое моделирование постановкой обратной задачи проведено на основе данных запыленности снежного покрова в одной геопривязанной точке по программе, разработанной в работах [7, 8].

Пусть ось x направлена на восток, ось y – на север и S – плоскостной источник примеси. Концентрацию слабо оседающей примеси за длительный промежуток времени (месяц, сезон, год) и на значительном удалении от точечного источника опишем с помощью соотношения [8, 9]

$$q(x, y) = \frac{m(\xi, \eta)P(\varphi(x, y, \xi, \eta) + 180^\circ)}{2\pi u H \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} \quad (1)$$

где $\varphi(x, y, \xi, \eta) = \arctg \frac{y - \eta}{x - \xi}$, (ξ, η) – координаты источника, $(\xi, \eta) \in S$, $m(\xi, \eta)$ – эмиссия примеси из этой точки, $P(\varphi)$ – роза вет-

ров за рассматриваемый промежуток времени на высотах пограничного слоя, u , H – средняя скорость ветра и высота слоя перемешивания соответственно.

Предполагается, что точка (x, y) удалена от источника на расстояние более 7–10 км. В этом случае соотношение (1) достаточно надежно описывает процессы длительного загрязнения местности для таких расстояний.

С учетом выражения (1) концентрацию от площадного источника S можно представить в виде

$$Q(x, y) = \frac{1}{2\pi u H} \iint_S \frac{m(\xi, \eta)P(\arctg \frac{y - \eta}{x - \xi} + 180^\circ)}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} d\xi d\eta \quad (2)$$

Здесь также предполагается, что точка (x, y) достаточно удалена от множества S .

Функция $m(\xi, \eta)$, как правило, неизвестна либо известна достаточно приближенно. В этом случае интерпретация данных наблюдений с помощью выражения (2) весьма затруднительна. Ситуация может быть существенно улучшена, если выражение (2) преобразовать, используя обобщенную теорему о среднем из интегрального исчисления. Согласно этой теореме, для двух произвольных непрерывных функций на связном компактном множестве имеет место следующее равенство:

$$\iint_S f(\xi, \eta)g(\xi, \eta)d\xi d\eta = f(\lambda, \mu) \iint_S g(\xi, \eta)d\xi d\eta \quad (3)$$

где $(\lambda, \mu) \in S$ и дополнительно предполагается, что $g(\xi, \eta) \geq 0$ на множестве S .

В нашем случае, полагая, что $g(\xi, \eta) = m(\xi, \eta)$

$$f(\xi, \eta) = \frac{P(\arctg \frac{y - \eta}{x - \xi} + 180^\circ)}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}$$

получаем простое соотношение

$$Q(x, y) = \frac{\theta P(\arctg \frac{y - \mu}{x - \lambda} + 180^\circ)}{\sqrt{(x - \lambda)^2 + (y - \mu)^2}} \quad (4)$$

где $\theta = M / (2\pi u H)$, $M = \iint_S m(\xi, \eta)d\xi d\eta$ – суммарное поступление примеси от площадного источника.

Анализ зависимости (4) показывает, что для определения функции $Q(x, y)$ достаточно оценить неизвестные параметры M , λ , μ , используя, например, данные наблюдений. Ситуация может быть значительно упрощена, если известно положение на территории доминирующего точечного источника. В этом случае $\lambda = x_0$, $\mu = y_0$, где x_0 , y_0 – координаты эффективного источника.

Полученные модели апробированы путем проверки сходимости вычисленных и экспериментальных данных запыленности снега (в г/л) по 22 точкам (за исключением опорной точки).

Проботбор почв из дернового А0 и гумусового А1 горизонтов и лиственницы (*Larix cajanderi* Маур.) проведен в сухую и солнечную погоду в августе 2002 и 2003 гг.

Пробы почв (66 образцов) помещались в холщовые мешочки и в полевых условиях сушились до воздушно-сухого состояния. Пробы лиственницы (51 образец) собирались с веток равномерно на уровне 1.5–2 м с деревьев диаметром 6–7 см приблизительно одного возраста. После очистки от примесей проба высушивалась при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния [10, 11].

Для изучения элементного состава проб применялся рентгено-флюоресцентный метод с использованием синхротронного излучения на станции элементного анализа ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Пробы почв массой 200 г после просушки до постоянной массы измельчались до 200 меш, брались навески (30 мг) и спрессовывались в таблетки (диаметром 6 мм). Пробы хвои, хвойных узлов и молодых веток лиственницы перед таблетированием концентрировали путем озоления в щадящем режиме (медленное нагревание до 350 °С в течение 2 ч) для сохранения легколетучих компонентов. При расчете концентраций элементов использованы международный стандарт почвы SOIL-7 МАГАТЭ, российский стандарт злаковой травосмеси ЗСБМТ-02 № 3170–85. Относительное стандартное отклонение в определении концентраций вышеуказанных элементов составляет 10–15 %, нижние пределы обнаружения – до 0.1 м. д. в зависимости от энергии возбуждения эмиссионных линий.

Анализ на содержание азота в хвое лиственницы выполняли в лаборатории микроана-

лиза НИОХ СО РАН (Новосибирск) на автоматическом элементном СНН-анализаторе (фирма «Карло Эрба», модель 1106, Италия). Метод основан на высокотемпературной окислительной деструкции (1100 °С) органического образца (измельченного до порошка), разделении продуктов деструкции на хроматографической колонке и определении детектором по теплопроводности. Методика метрологически аттестована Уральским НИИ метрологии в соответствии с ГОСТ 8.563–96. Относительная погрешность 7 %, нижний предел обнаружения 0.1 % (по массе).

Анализ на содержание серы в хвое лиственницы проведен в НИОХ СО РАН. Метод основан на высокотемпературном (1300 °С) окислительном разложении (сжигании) органического образца в колбе, наполненной кислородом (метод Шенигера). Образующийся сульфат-ион титруется раствором азотно-кислого бария в присутствии индикатора хлорфосфоназа III. Методика аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563–96 Уральским НИИ метрологии. Относительная погрешность 20 %, нижний предел обнаружения 0.01 % (по массе).

Компьютерные варианты модели атмосферного загрязнения территории НТЭЖ с реально измеренными данными запыленности снежного покрова, результатами анализа проб почв и растительности сведены на геокодированную карту масштаба 1 : 100 000 (с реальными географическими координатами) в единый ГИС-проект с использованием программы SGIT (ГИС-Центр ОИГГМ СО РАН, Новосибирск) и ГИС-системы геокодирования Envi (США), а также системы интерполяции пространственно-привязанных данных ArcView3.2 (ESRI, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение прямой задачи математического моделирования позволило оконтурить шлейфы атмосферного загрязнения, вытянутые преимущественно в юго-восточном направлении, как в среднегодовом временном срезе, так и в срезе на зимний период. Наиболее губительным для хвойного леса является загрязнение SO_2 [12]. Согласно модели, содержание SO_2 в долине руч. Семеновский к юго-вос-

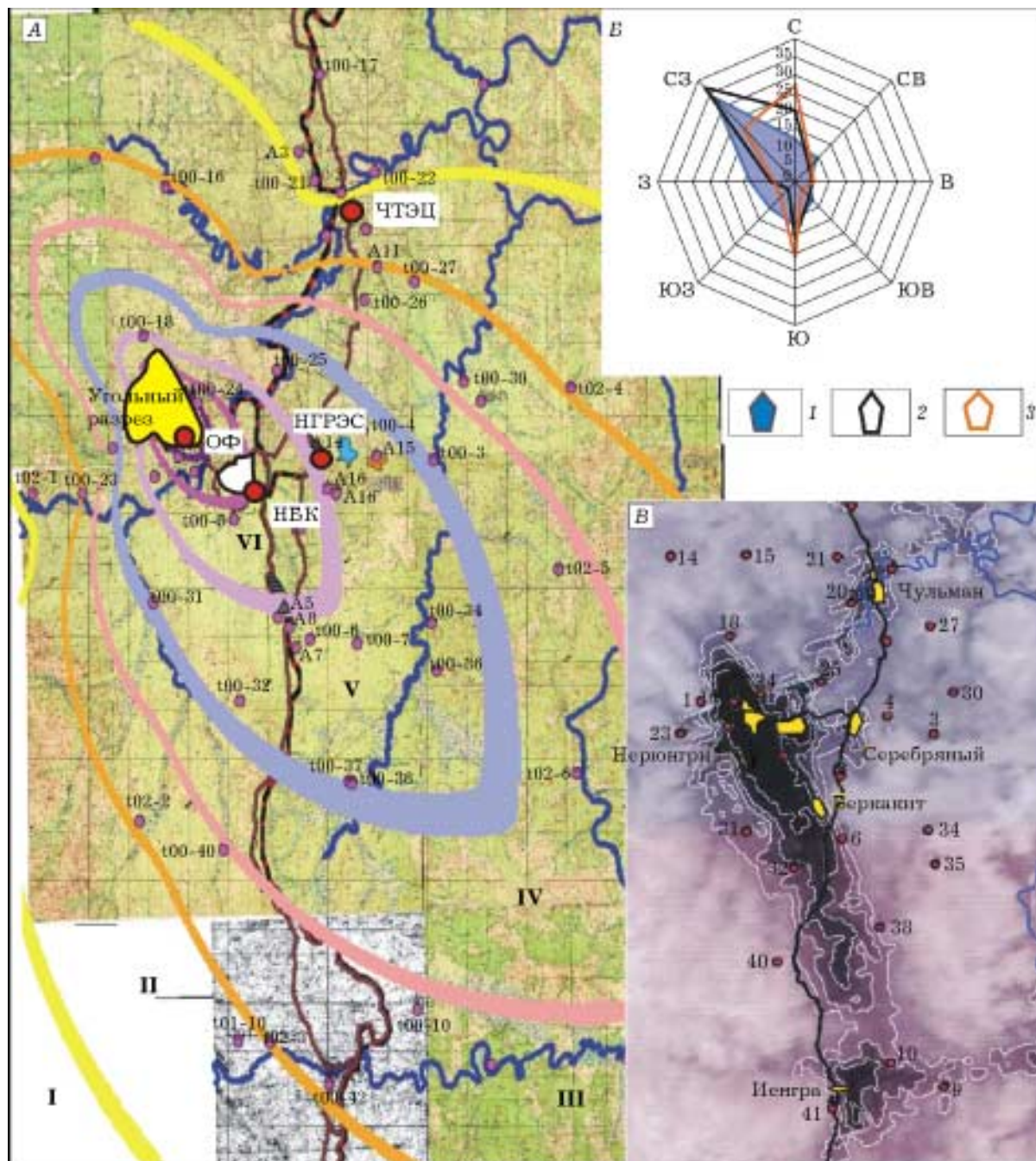


Рис. 1. Территория Нерюнгринского топливно-энергетического комплекса: А – ГИС-модель атмосферного загрязнения с зонами разной степени запыленности снежного покрова (ЧТЭЦ – Чульманская ТЭЦ, НГРЭС – Нерюнгринская ГРЭС, НБК – Нерюнгринская водогрейная котельная, ОФ – обогатительная фабрика Нерюнгринского угольного разреза); Б – роза ветров (м/с) в Чульмане в разные годы: 1946–1960 (1), 1966–1980 (2), 1996–1998 (3); В – космоснимок ИКФИА СО РАН, 21 апреля 2001 г. Пояснения см. в тексте.

току от Чульманской ТЭЦ достигает 0.03 мг/м^3 , или 1.5 ПДК, установленной для растительности [13]. Здесь же расположена зона загрязнения NO_2 с содержанием $\sim 0.04 \text{ мг/м}^3$, т. е. на уровне ПДК (рис. 1). Высокие трубы Нерюнгринской ГРЭС и водогрейной котельной обуславливают перемешивание их выбро-

сов в большем объеме воздуха, поэтому участки с превышением ПДК не формируются.

Юго-восточная сторона от угольного разреза – долина р. Чульман у устья р. М. Беркамит и долина р. Амунакты к юго-востоку от г. Нерюнгри – сильно загрязнены не только пылью, но и газовыми выбросами обогати-

ТАБЛИЦА 2

Значения коэффициентов сопоставления вычисленных и измеренных данных запыленности снега на территории НТЭК

Параметр	Вариант 1	Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	
	ОТ 1	ОТ 7	ОТ 36	ОТ 36	ОТ 27	ОТ 8	ОТ 7
$K_{\text{рег}}$	0.98	4.17	5.82	3.44	56.05	2.97	10.37
$K_{\text{зон}}$	1.01	1.34	1.86	0.77	12.59	1.38	4.82

Примечание. ОТ – опорная точка.

тельной фабрики. Поле максимальных (0.14 мг/м^3 при ПДК пыли 0.15 мг/м^3 для человека [14]) концентраций пыли в приземном слое атмосферы сформировано к юго-востоку от г. Нерюнгри в пределах 1–4 км: в долине и правом борту р. Амунакты.

При решении обратной задачи рассмотрены варианты расчетов, в которых основные объекты Нерюнгринского ТЭК поочередно приняты за эффективный (доминирующий) источник загрязнения. При каждом варианте выбиралась опорная точка, расположенная по ходу преобладающих северо-западных ветров (к юго-востоку от объекта) на удалении, равном 7–13 км.

В итоге на конец зимнего периода (в г/л талого снега) получено четыре варианта данных запыленности снежного покрова в каждой из 179 361 точек, выделенных по сетке на территории НТЭК.

Проведена оценка степени реальности моделей рассмотренных вариантов. Для этого рассчитаны коэффициенты сопоставления вычисленных по модели и реально измеренных данных запыленности снежного покрова $K_{\text{рег}}$ по 22 точкам:

$$K_{\text{рег}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{\text{изм. } i} / \theta_{\text{выч. } i})}{n}$$

и $K_{\text{зон}}$ для ближайших от эффективного источника точек в радиусе не более 10–13 км:

$$K_{\text{зон}} = \frac{\sum_{j=1}^m (\theta_{\text{изм. } j} / \theta_{\text{выч. } j})}{m} \quad (5)$$

где $m = 2-6$.

Наиболее адекватным оказался вариант 1 (табл. 2), в котором угольный разрез с обогатительной фабрикой, представленный в виде единого стационарного площадного источника к путем наложения 2361 точек, принят за

эффективный. В этом варианте уровень соответствия реально-измеренных и вычисленных значений запыленности снега оказался наиболее высоким – значения $K_{\text{рег}}$ и $K_{\text{зон}}$ близки к 1 (см. табл. 2). Разница измеренных и вычисленных значений в среднем не превышает 53 %. В 15 из 22 проб вычисленные значения больше реально измеренных значений запыленности снега, что, возможно, обусловлено поправкой на уклон поверхности, экспозицию, лесистость и другие естественные факторы. В семи случаях реально измеренные значения больше вычисленных, что объясняется близким расположением от точек отбора локального линейного объекта (дороги) и его дополнительным вкладом в региональное загрязнение.

Другие варианты моделей атмосферного загрязнения значительно расходятся с данными наблюдений, так как $K_{\text{рег}}$ и $K_{\text{зон}}$ существенно отклоняются от 1. Таким образом, только одна модель (вариант 1) наиболее адекватно описывает реальную картину атмосферного загрязнения территории НТЭК. Согласно этой модели, взрывные работы на карьере разреза «Нерюнгринский» и выбросы обогатительной фабрики являются доминирующим источником атмосферного загрязнения территории. Вклад объектов теплоэнергетики – Нерюнгринской ГРЭС, Чульманской ТЭЦ и Нерюнгринской водогрейной котельной, – считавшихся ранее главными загрязнителями [15], менее значителен.

Шлейф среднезимнего атмосферного загрязнения вытянут в юго-восточном направлении более чем на 80 км от угольного разреза, его ширина не превышает 40 км (согласно розе ветров) и совпадает со шлейфами загрязнения, полученными методом постановки прямой задачи (см. рис. 1). Контуры этого шлейфа достаточно хорошо совпадают с

альbedo заснеженной поверхности, сделанного со спутника в весеннее время (космоснимок ИКФИА СО РАН), поскольку в период снеготаяния изменения альbedo пропорциональны уровню загрязнения снежного покрова.

В шлейфе атмосферного загрязнения нами выделены следующие зоны: I – с очень высокой степенью загрязненности (пыльность снега 0.4–0.7 г/л), II – с высокой степенью загрязненности (0.2–0.4 г/л), III – умеренно-загрязненная (0.1–0.2 г/л), IV – загрязненная (0.1–0.07 г/л), V – слабозагрязненная (0.05–0.07 г/л), VI – практически чистая (0.03–0.05 г/л), VII – фоновая (меньше 0.03 г/л).

Изучено содержание металлов в почвах и растительности в выделенных по результатам моделирования зонах.

В почвах диапазон концентраций тяжелых металлов (ТМ) весьма широк. Чем выше степень техногенного загрязнения зоны, тем больше содержание Fe, Cr, Ni, Mo в гумусовом горизонте почв (с коэффициентом корреляции не ниже 0.66) (рис. 2). В зоне с очень высокой степенью загрязненности (I) содержание железа в почвах на уровне 53.2–54.1 г/кг, тогда как в фоновой (зона VII) – около 40.6–41.5 г/кг. Содержание Mo в почвах зоны I составляет до (21.7 ± 2.1) мг/кг, тогда как в фоновой (зона VII) его почти на порядок меньше – (2.82 ± 0.3) мг/кг при кларке Mo в почвах 2 мг/кг [16]. Для остальных ТМ зависимости их концентрации в почвах от степени атмосферного загрязнения не наблюдается. При этом в почвах самой сильнозагрязненной зоны существующие ПДК почв не превышены.

Выявлено, что распределение марганца по горизонтам A0 и A1 носит закономерный характер: в дерновом горизонте его существен-

но больше $((2.14 \pm 0.21)$ г/кг), чем в гумусовом $((0.84 \pm 0.07)$ г/кг).

Химический состав растений зависит в первую очередь от способности растения накапливать те или иные элементы, в том числе биофильные тяжелые металлы (медь, кобальт и др.), участвующие в метаболизме растений. К естественным факторам, определяющим химический состав растений, отнесены состав почвы, подстилающих пород, ландшафтное положение, климатические и погодные условия (дожди способствуют смыву элементов, а сухая погода – увеличению концентраций за счет усиления транспирации), а также аэрозольный состав приземного слоя воздуха, интенсивность выпадения пыли и ее химический состав.

Наибольшего внимания среди загрязняющих веществ занимают азот- и серосодержащие компоненты, содержащиеся в продуктах сгорания топлива и взрывчатки, поскольку они активно воздействуют на растительность [12–14]. На юго-востоке от обогатительной фабрики (долина р. Чульман у устья р. М. Беркакит), а также к юго-востоку от Чульманской ТЭЦ (долина руч. Семеновский), т. е. на участках с превышающим или близким к ПДК содержанием оксидов серы и азота в приземном слое воздуха (согласно результатам моделирования) наблюдается увеличение массовой доли S в хвое лиственницы, %: 0.3 ± 0.06 и 0.215 ± 0.043 соответственно против 0.11 ± 0.02 на фоновом участке. Также отмечено увеличение массовой доли серы в хвое лиственницы около золотвала Нерюнгринской ГРЭС (бассейн р. Олонгоро) – около (0.25 ± 0.05) %. Итак, при атмосферном загрязнении содержание серы в хвое лиственницы возрастает в 2–3 раза по

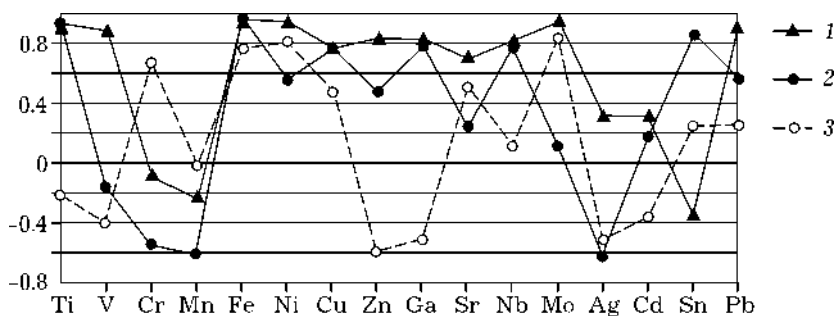


Рис. 2. Коэффициенты корреляции данных запыленности снежного покрова с содержанием тяжелых металлов в хвойных уздах (1), хвое лиственницы (2) и в гумусовом горизонте почв (3).

ТАБЛИЦА 3

Соотношение концентраций *C* различных тяжелых металлов в хвойных узлах, хвое и ветках лиственницы на территории Нерюнгринского ТЭЖ

Соотношение концентраций					
~1	1.5–2	2–3	3–5	5–10	Более 10
<i>В хвойных узлах/в хвое</i>					
K, Ca, Rb, Sr, U	V, Cr, Ni, Cu, Bi	Mn, Zn, Ag	Ti, Ga, Y, Mo, Cd, Tl	Pb, Th, Zr	Fe, Sb, Nb, Sn
<i>В хвойных узлах/в ветках</i>					
K, Ca, Rb, Sr, U,	V, Mn, Zn	Ga, Mo, Y, Cd	Ti, Cr, Fe, Zr, Pb, Th	Tl	Nb, Sn, Sb
Ni, Cu, Ag, Bi					

сравнению с фоновым уровнем. Аналогичная картина наблюдается в хвое ели (*Picea obovata* Ledeb.) в Кемеровской области [17].

Согласно математической модели, оконтуренные участки загрязнения SO_2 на территории Нерюнгринского ТЭЖ совпадают с участками произрастания лиственниц с повышенным содержанием серы в хвое, что также подтверждает адекватность модели.

Содержание азота в хвое лиственницы почти на порядок больше по сравнению с содержанием серы с более узким диапазоном вариаций, мас. %: от 1.72 ± 0.12 в фоновой (VII) зоне до 1.92 ± 0.13 к юго-востоку от угольного разреза, 2.12 ± 0.15 в долине руч. Семеновский к юго-востоку от Чульманской ТЭЦ и до 2.49 ± 0.17 в бассейне руч. Олонгоро у золоотвала Нерюнгринской ГРЭС. В менее загрязненных зонах содержание азота в хвое лиственницы содержится на фоновом уровне. Таким образом, при сильном атмосферном загрязнении максимальное увеличение содержания азота в хвое лиственницы составляет всего около 45 % от фонового значения, тогда как содержание серы увеличивается почти в 3 раза. Это говорит о том, что, несмотря на меньший удельный вес оксидов серы в выбросах объектов НТЭЖ по сравнению с оксидами азота, их воздействие на растительность намного сильнее.

Щелочные и щелочно-земельные металлы в отличие от ТМ в органах лиственницы (хвойных узлах, хвое и ветках) накапливаются равномерно. Выявлено, что содержание ТМ в хвойных узлах лиственницы больше, нежели в хвое и ветках: в среднем почти в 10 раз выше, чем в хвое и почти в 5 раз выше, чем в ветках (табл. 3). Характерна прямая пропорциональная зависимость между концентрациями ТМ: чем больше ме-

талла в хвойных узлах, тем больше его и в хвое и ветках (коэффициент корреляции ~0.7). Для Ti, Mn, Fe, Cu, Ga, Rb, Y, Zr, Nb, Th коэффициент корреляции составляет не менее 0.85. Поскольку элемент наиболее активно накапливается в почках лиственницы, анализ пространственного (зонального) изменения химического состава тканей лиственниц на территории Нерюнгринского ТЭЖ проведен именно по составу хвойных узлов лиственницы.

По мере увеличения степени техногенного загрязнения возрастает содержание ТМ в тканях лиственницы, например в хвойных узлах, мг/кг: V 10–15, Ni 0.6–2, Cu 2–7.5, Zn 30–70, Ga 0.4–1, Mo 0.05–0.16, Pb 2.1–6. Содержание Fe возрастает с 0.6 г/кг в фоновой зоне до 2.3 г/кг в зоне с очень высокой степенью загрязнения (рис. 3). Выявлена прямая корреляционная связь между содержанием практически всех ТМ в тканях лиственницы и степенью техногенной загрязненности зон со средним коэффициентом 0.66, тогда как в верхних горизонтах почв подобная корреляция характерна только для Fe, Cr, Ni, Mo (см. рис. 2).

Выявлена тенденция снижения накопления Mn в тканях лиственницы при техногенном загрязнении: в почках лиственницы фоновой зоны содержание Mn составляет 1420 мг/кг, в зоне с очень сильной степенью загрязнения – около 960 мг/кг, у золоотвала НГРЭС – источника весьма сильного локального загрязнения – всего 534 мг/кг. Коэффициент обратной корреляции равен –0.61. Подобное поведение Mn зафиксировано в хвое ели сибирской в Кемеровской области: содержание Mn уменьшается в 2.5–10 раз на загрязненных участках по сравнению

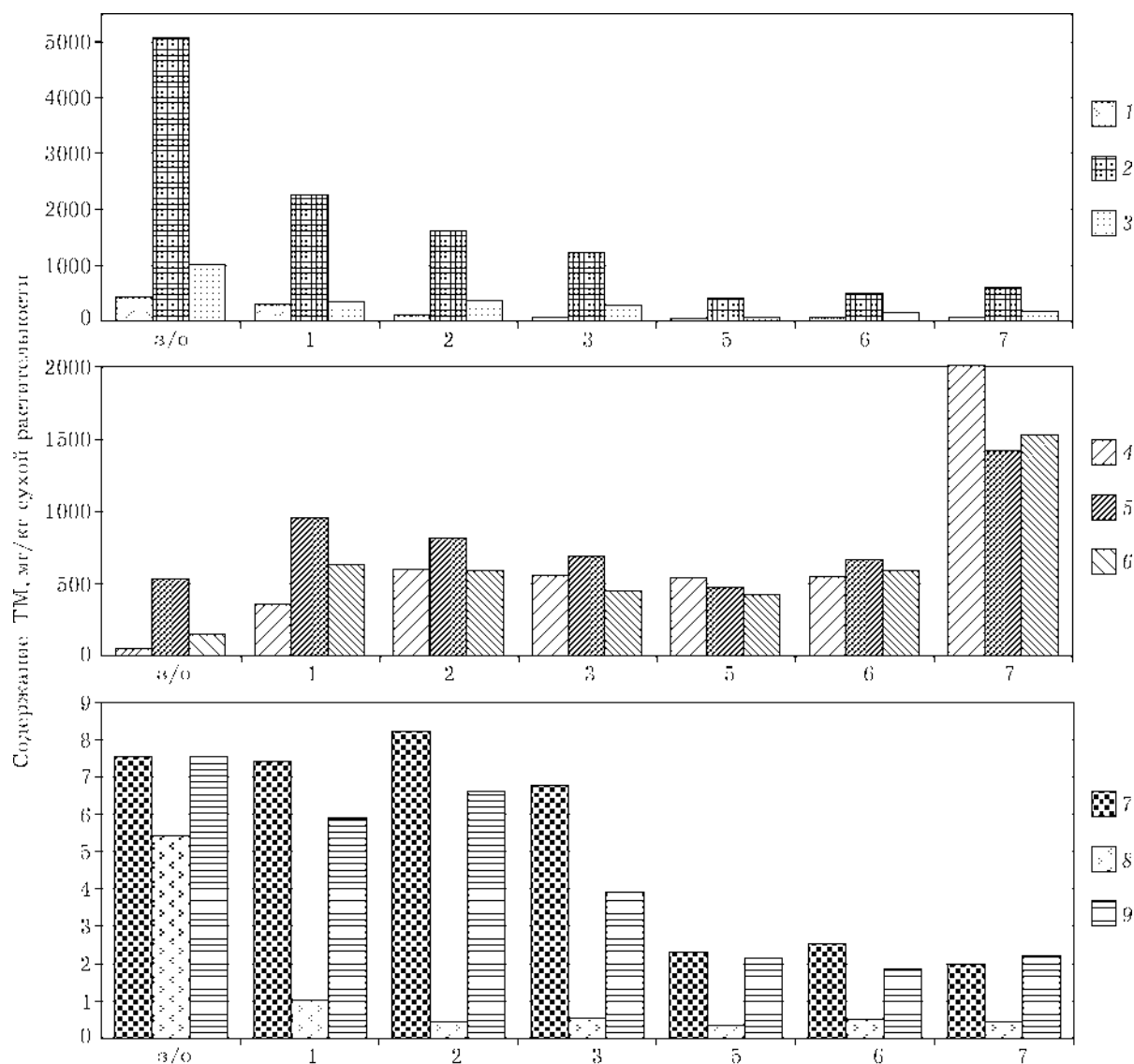


Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в тканях лиственницы в зоне с очень высокой (1) и высокой (2) степенью загрязненности, загрязненной (3), слабозагрязненной (5), практически чистой (6), фоновой (7), на локальном участке весьма сильного загрязнения у золоотвала НГРЭС (з/о): 1-3 – Fe в хвое (1), хвойных узлах (2), ветках (3); 4-6 – Mn в хвое (4), хвойных узлах (5), ветках (6); 7-9 – Cu (7), Ga (8), Pb (9) в хвойных узлах.

с контрольным, тогда как содержание других ТМ увеличивается [17].

ВЫВОДЫ

1. По данным запыленности снежного покрова получена адекватная количественная модель атмосферного загрязнения, экспериментально апробированная. Согласно розе ветров, основной шлейф загрязнения вытянут в юго-восточном направлении до 80 км,

что также подтверждается совпадением его контуров с альбедо поверхности Земли, зафиксированным на космоснимке.

2. Впервые выявлено, что доминирующим источником загрязнения является Нерюнгринский угольный разрез, где ведутся постоянные взрывные работы, а не НГРЭС, как считалось ранее. Расположение основного населенного пункта региона – г. Нерюнгри – в 6 км к юго-востоку от угольного разреза “Нерюнгринский” (в направлении формирования

шлейфа атмосферного загрязнения) указывает на наличие экологического риска для здоровья местного населения.

3. Оконтурыны участки с повышенным содержанием SO_2 и NO_2 в приземном слое воздуха к юго-востоку от невысоких источников: Чульманской ТЭЦ, ОФ Нерюнгринского угольного разреза и золоотвала НГРЭС. Выявлено, что в хвое лиственницы этих участков содержание серы в 3 раза, а азота почти на 45 % (по массе) выше фоновых значений.

4. Выявлено, что с увеличением степени атмосферного загрязнения возрастает содержание всех тяжелых металлов в тканях лиственницы (средний коэффициент корреляции ~0.66), тогда как в почвах подобная картина характерна только для нескольких элементов. Иными словами, ткани лиственницы являются лучшими индикаторами степени атмосферного загрязнения, нежели почвы.

5. Концентрация биофильного марганца в тканях лиственницы с усилением степени техногенного загрязнения снижается.

Работа выполнена совместно с Институтом прикладной экологии Севера АН РС(Я) (договор № 31-02), при поддержке РФФИ (проект № 03-05-96005), Президиума РАН (проект № 13.5), ИП СО РАН (проекты № 168, 169).

Авторы благодарят В. В. Иванова (ИПЭС АН РС(Я), Якутск) за предоставление данных по загрязненности снежного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные, ч. 1–6, вып. 24: Якутская АССР, кн. 1, Гидрометеиздат, Ленинград, 1989, 607 с.
- 2 Климат Якутска, Гидрометеиздат, Ленинград, 1982, 247 с.
- 3 А. Н. Федоров, Т. А. Ботулу, С. П. Варламов и др., Мерзлотные ландшафты Якутии (пояснительная записка к “Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1 : 2 500 000”), изд. ГУГК, Новосибирск, 1989, 170 с.
- 4 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, Гидрометеиздат, Ленинград, 1987, 92 с.
- 5 М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Я. С. Канчан и др., Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 3–18.
- 6 М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, С. С. Чичерин, Там же, 1982, вып. 479, с. 3–16.
- 7 В. Ф. Рапута, Т. В. Ходжер, А. Г. Горшков, К. П. Куценогий, *Оптика атмосферы и океана*, 11, 6 (1998) 650.
- 8 В. Ф. Рапута, Г. П. Королева, А. Г. Горшков, Т. В. Ходжер, Там же, 14, 6–7 (2001) 623.
- 9 Н. Л. Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов, Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси, Гидрометеиздат, Ленинград, 1991, 279 с.
- 10 Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений, Недра, Москва, 1965, 227 с.
- 11 Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами, Под ред. Н. Г. Зырина, С. Г. Малахова, Гидрометеиздат, Москва, 1981, 109 с.
- 12 Хальбваш Готфрид, Реакция организмов высших растений на загрязнение атмосферы двуокисью серы и фторидами, Загрязнение воздуха и жизнь растений, Гидрометеиздат, Ленинград, 1988, 206–246 с.
- 13 М. Е. Берлянд, Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы, Гидрометеиздат, Ленинград, 1985, 272 с.
- 14 Э. Ю. Безуглая, Г. П. Расторгуева, И. В. Смирнова, Чем дышит промышленный город, Гидрометеиздат, Ленинград, 1991, 255 с.
- 15 О состоянии окружающей природной среды Республики Саха (Якутия) в 1998 году (государственный доклад), Якутск, 1999, 316 с.
- 16 А. П. Виноградов, Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах, Изд-во АН СССР, 1950, 278 с.
- 17 О. А. Неверова, *Сиб. экол. журн.*, 1 (2002) 59.