

## **ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЕСОМАГ<sup>15</sup>**

Мотовилов Ю.Г.  
Институт водных проблем РАН, Москва,  
motol@pochta.ru

Среди других промышленных производств особое место по масштабам и влиянию на окружающую среду занимают предприятия крупнейшей в мире по производству никеля компании «Норильский никель», которые обеспечивают добычу руды и около 20% мирового производства никеля. Основные предприятия компании сосредоточены в двух экологически напряженных регионах Приполярья – на Кольском полуострове и полуострове Таймыр. Около половины объема добычи руды и производства никеля компании сосредоточены в дочернем Кольском филиале компании, в частности на предприятиях комбината Печенганикель (КП). В зоне деятельности комбината отмечаются деградация лесов, высокое загрязнение почвы и подземных вод тяжелыми металлами. Реки Колос-йоки и Луотти-йоки с их притоками, в которые осуществляются сбросы промышленных сточных вод КП, на протяжении многих лет являются одними из самых загрязненных рек России тяжелыми металлами. Негативное воздействие предприятий КП на окружающую среду тесно переплетается с проблемами трансграничного загрязнения. Приграничные норвежские и финские территории на протяжении многих лет регулярно подвергаются техногенному воздействию, как в результате атмосферного переноса загрязняющих веществ, так и трансграничными водными объектами на границе с Норвегией. Поэтому вопросы трансграничного загрязнения окружающей среды предприятиями комбината Печенганикель находятся в рамках регулирования международных конвенций и межправительственных соглашений по окружающей среде в трансграничном контексте, объектом научных и мониторинговых исследований в рамках международных проектов, под пристальным вниманием российских и международных экологических организаций [1].

---

<sup>15</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-05-09022).

Цель настоящего исследования заключалась в разработке модели формирования стока и качества вод для речных бассейнов, расположенных в зоне влияния комбината Печенганикель, и оценки с помощью разработанной модели динамики загрязнения указанных бассейнов тяжелыми металлами.

**Модель ЕСОМАГ.** Для оценки антропогенного вклада в загрязнение речных вод в зоне деятельности КП задействована модель ЕСОМАГ, которая состоит из двух блоков: подмодели формирования стока и подмодели формирования качества воды в речных бассейнах [2, 3]. Первая подмодель описывает основные процессы гидрологического цикла суши: формирование снежного покрова и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвогрунтов, инфильтрацию талых и дождевых вод в почву, испарение, динамику влажности почвы, формирование поверхностного, подповерхностного, грунтового и речного стока. Подмодель формирования качества речных вод описывает процессы аккумуляции загрязнений на поверхности речного бассейна, их растворение талыми и дождевыми водами, просачивание растворенных поллютантов в почву, взаимодействие с почвенным раствором и твердой фазой почвы, биохимическую деградацию. Режим растворенных поллютантов в речном бассейне зависит от интенсивности гидрологических процессов. Загрязнения переносятся главным образом водными потоками, то есть поверхностным, подповерхностным, грунтовым и речным стоком. Количество загрязнений, выносимых речным стоком из бассейна, определяется как комбинацией компонентов формирования речного стока, так и антропогенной нагрузкой на речной бассейн. Поэтому, гидрологические характеристики, определяемые с помощью гидрологического модуля, используются также как входы для подмодели формирования качества вод.

**Комбинат Печенганикель** был построен в 1945 году на северо-западе Кольского полуострова в непосредственной близости от границ России с Норвегией и Финляндией. Комбинат располагается на двух промплощадках в г. Заполярный и пос. Никель (рис. 1), и включает рудники, обогатительную фабрику, цех обжига, плавильный цех, сернокислотный цех и другие вспомогательные цеха. Комбинат потребляет на технологические нужды большие объемы свежей и оборотной воды. Объем оборотного водоснабжения составляет 80% от общего водопотребления. Комбинат сбрасывает в поверхностные водные объекты шахтные и карьерные воды, фильтра-

ционные воды хвостохранилища и отстойных прудов. Для снижения отрицательного воздействия производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод на водные объекты на комбинате действуют станции физико-химической и биологической очистки вод, пруды-отстойники, локальные очистные сооружения по очистке промстоков от транспортных и энергетических цехов комбината.

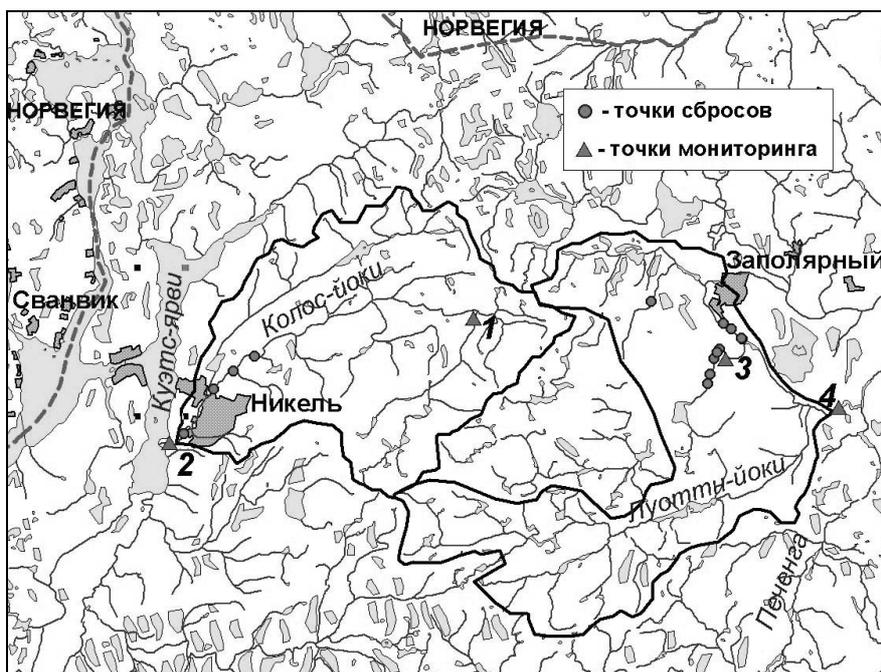


Рис. 1 – Расположение исследуемых водосборов, точек сброса сточных вод и мониторинга качества речных вод

На комбинате насчитывается 14 концентрированных выпусков сточных вод: 4 из них расположены на промплощадке пос. Никель и сбрасываются в р. Колос-йоки, а 10 на промплощадке г. Заполярный – сбрасываются в р. Луоттн-йоки и ее притоки. Сточные воды комбината содержат широкий спектр загрязняющих веществ, содержание которых в них контролируется подразделением комбината Печенганикель (контроль за окружающей средой).

**Исследуемая территория** (рис. 1). Река Колос-йоки впадает в озеро Куэтс-ярви. Длина реки 21 км, площадь водосбора составляет 140 км<sup>2</sup>. Река Луоттн-йоки впадает в р. Печенга. Длина реки 29 км, площадь водосбора составляет 96 км<sup>2</sup>. Рельеф исследуемой терри-

тории представляет собой холмистую равнину. Средняя высота водосбора – 260 м, лесистость – 50 %, озерность – 4 %, заболоченность территории – 10 %. Господствующими типами почв являются подзолы (иллювиально-гумусовые и иллювиально-железистые). По механическому составу относятся к песчаным и галечниковым. Также встречаются глинистые и кислые метаморфические почвы. Преобладают таежные и лесотундровые типы ландшафтов.

**Исходные данные и краевые условия.** Модельная пространственная схематизация речных бассейнов производилась на основе электронных карт региона (рельеф, почвы, ландшафты) с помощью ГИС-технологии на базе пакета ArcView. Вся территория покрывалась нерегулярной сеткой из элементарных водосборов (пространственных расчетных ячеек) с необходимым для расчетов разрешением и на поверхности водосборов выделялась модельная речная сеть. Всего на территории бассейнов рек Колос-йоки и Луоттн-йоки было выделено около 150 элементарных водосборов.

В качестве граничных условий для гидрологического блока модели ЕСОМАГ задаются суточные поля метеоданных (температура воздуха, осадки, влажность воздуха). Для построения метеорологических полей на территорию Кольского полуострова было задействовано 18 метеостанций. Гидрологическая модель в непрерывном режиме рассчитывает поля снежного покрова, увлажнения и промерзания почвы, снеготаяния и речного стока в русловой сети. Данные по расходам воды на гидрологических постах Кольского полуострова (включая пост Никель на устьевом участке реки Колос-йоки) были задействованы для калибровки параметров и испытаний гидрологического блока модели.

Данные по среднемесячным расходам воды со среднемесячной концентрацией поллютантов в 14-ти точках концентрированных сбросов загрязняющих веществ в речную сеть (рис. 1) задавались в качестве точечных источников загрязнения речных вод в блоке модели формирования качества речных вод.

Среднемесячные объемы производственных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на промплощадках комбината в г. Никель и пос. Заполярный, а также среднемесячные концентрации поллютантов в выпадающих атмосферных осадках по ст. Сванвик (Норвегия), расположенной в восьми километрах от п. Никель, были использованы для задания пространственно-распределенной антропогенной нагрузки на водосборы (граничных условий в этом

блоке модели). Данные для гидрохимического блока модели, как и гидрометеорологические, были собраны за период 2001 – 2004 г.

К сожалению, имеющейся информации по пространственному загрязнению почвогрунтов в районе комбината Печенганикель недостаточно для корректного задания начальных условий – полей загрязнения территории. Поэтому они были восстановлены на основе всей имеющейся гидрометеорологической, гидрохимической и водохозяйственной информации путем непрерывного моделирования загрязнения исходно чистого речного бассейна за период работы комбината (с 1945 г.) с учетом эмпирических связей интенсивности атмосферных выпадений загрязняющих веществ в зависимости от расстояния от источника выбросов [4].

**Параметры модели.** Большинство параметров гидрологического блока модели задавались на основе картографической информации (DEM, структуры речной сети, пространственных распределений почв и растительности и т.д.), региональных справочников свойств почв (пористость, наименьшая влагоемкость, влажность завядания) и специальной базы данных ЕСОМАГ для параметров растительности и землепользования (коэффициенты стаивания снега, максимальной емкости поверхностного задержания, распространения корневой системы между слоями почвы, коэффициенты шероховатости Маннинга). Ряд параметров (коэффициенты испаряемости в формуле Дальтона, вертикальные и горизонтальные коэффициенты гидравлической проводимости почво-грунтов при насыщении) были откалиброваны с использованием критерия Нэша и Сатклифа (NSE).

Наиболее важными и чувствительными параметрами подмодели качества воды являются константа сорбционного равновесия линейной изотермы Фрейндлиха для почвогрунтов [5] и два параметра, характеризующих обмен поллютантов в речной воде с ложем реки и интенсивность растворения дождевыми и тальными водами поллютантов, выпавших на поверхность речного бассейна в виде сухого осаждения от выбросов в атмосферу. Эти параметры были откалиброваны по данным о динамике концентрации поллютантов в речной воде.

**Результаты.** Из широкого спектра загрязняющих веществ, воздействующих на окружающую среду в районе КП, в работе рассмотрено поведение основного загрязнителя – никеля. Рассчитанные по модели ЕСОМАГ и фактические гидрографы стока в устье

р. Колос-йоки, и динамика концентраций никеля в различных точках гидрохимического мониторинга на реках Колос-йоки и Луотти-йоки приведены на рис. 2.

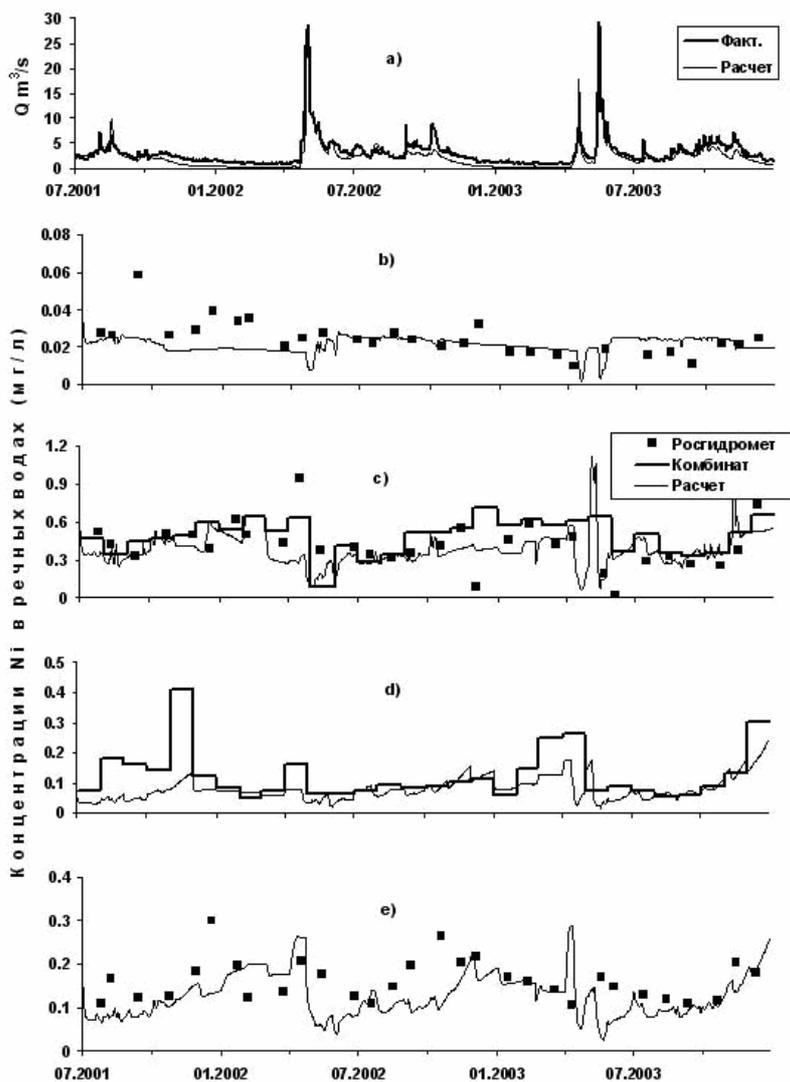


Рис. 2 – Фактические и рассчитанные гидрографы стока (а) и концентрации N в речных водах в точках мониторинга 1 (b), 2 (c), 3 (d) и 4 (e) за период с 1 августа 2001 – 31 декабря 2003 года

Результаты свидетельствуют, что модель хорошо воспроизводит процессы формирования стока ( $NSE=0.80$ ). Рассчитанная динамика концентраций  $Ni$  в различных точках речной сети в целом находится в удовлетворительном соответствии с данными измерений. В большинстве случаев отмечаются расхождения того же порядка, что и между данными измерений концентраций мониторинговыми службами комбината Печенганикель и Росгидромета (рис. 2 с). Средний диапазон измеренных и рассчитанных концентраций никеля в речной воде Колос-йоки за рассматриваемый период в точке мониторинга 1, характеризующей фоновый уровень загрязнения реки, составляет 0.018-0.035 мг/л (рис. 2б); в точке 2, расположенной ниже по течению от всех точечных источников загрязнения – 0,3-0,7 мг/л (рис. 2с). На р. Луоотти-йоки в точках мониторинга 3 и 4 концентрации никеля в речных водах меняются в диапазоне 0,10-0,20 мг/л (рис. 2d, e).

Для оценки вклада различных составляющих антропогенной нагрузки в загрязнение речных вод была проведена серия численных экспериментов, поясняющих поведение никеля в речном бассейне в различных ситуациях. В частности, рассматривались следующие два сценария.

Первый сценарий включает только один источник загрязнения окружающей среды: концентрированные сбросы сточных вод в речную сеть, в то время как эффект загрязненной почвы исключается (сценарий 1). Второй сценарий отражает ситуацию, когда комбинат больше не работает (нет никаких выбросов в атмосферу и сбросов сточных вод в речную сеть), а загрязнение воды в реке обусловлено только за счет притока подземных вод, формирующихся в результате выпадения на поверхность бассейна чистых атмосферных осадков, проходящих через загрязненную почву (сценарий 2).

Для бассейна р. Колос-йоки получены следующие результаты моделирования. Значительный вклад (в среднем от 50 до 80%) в загрязнение речных вод дают сильно загрязненные почвенно-грунтовые воды в результате значительных выбросов в атмосферу за длительный период работы комбината. Даже выпадающие чистые осадки, проходя через загрязненные почвы, выклиниваются в реку уже грязными почвенно-грунтовыми водами. Подтверждением этих выводов являются и простые балансовые расчеты:

– вынос никеля в устьевом створе в 2002 г. составил по данным Росгидромета 49.0 т, по данным мониторинговой службы комбина-

та 43.3 т, по модели 37.3 т, концентрированные сбросы никеля в речную сеть в 2002 г. составили 2.83 т;

–вынос никеля в устьевом створе в 2003 г. составил по данным Росгидромета 29.7 т, по данным комбината 48.7 т, по модели 31.1 т, сбросы никеля в речную сеть составили 7.43 т.

Результаты моделирования показывают, что даже при прекращении работы комбината на очищение бассейна и речных вод р. Колос-йоки до фоновых концентраций потребуются около 3-х десятилетий.

Анализ результатов численных экспериментов показывает, что в отличие от бассейна р. Колос-йоки, сбросы загрязненных вод в речную сеть р. Луоттн-йоки дают значительный вклад в загрязнение речных вод. В первую очередь это связано со значительно меньшими выбросами в атмосферу на промплощадке пос. Заполярный по сравнению с производствами в г. Никель и, таким образом, значительно меньшим загрязнением почв в бассейне р. Луоттн-йоки. Вклад сосредоточенных сбросов никеля в загрязнение речных вод составляет в среднем 50 – 70% в летний период и до 80 –90% в зимне-весенний.

**Заключение.** Модель удовлетворительно воспроизводит наблюдаемые концентрации никеля в речных водах и позволяет оценивать динамику загрязнения вод с более высоким пространственно-временным разрешением, чем на основе существующей сети мониторинга. Продемонстрированы способности модели для оценки возможных изменений загрязнения речных вод при различных сценариях функционирования комбината Печенганикель.

#### Литература

1. Горно-металлургическая компания «Норильский никель» (влияние на окружающую среду и здоровье людей). Доклад объединения Bellona. 2010, 71 с.

2. *Мотовилов Ю.Г., Белокуров А.С.* Моделирование процессов переноса и трансформации загрязнений в речном бассейне для задач экологического мониторинга. Тр. ИПГ, 1997, вып.81. С.49 - 60.

3. *Motovilov Yu.G.* ECOMAG: a distributed model of runoff formation and pollution transformation in river basins solution // IAHS Publ. 2013. V. 361. P. 227–234

4. *Раткин Н.Е., Асминг В.Э., Кошкин В.В.* Моделирование аэро-техногенного загрязнения покрова (на примере Печенгского рай-

она). В сб.: Эколого-географические проблемы Кольского Севера, Кольский научный центр РАН, Институт проблем промышленной экологии Севера, Апатиты. 1999, с. 28–42.

5. *Sauve, S., Manna, S., Turmel, M.-C., Roy, A.G. & Courchesne, F.* Solid-solution partitioning of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in the organic horizons of a forest soil. *Environ. Sci. Technol.* (2003). 37(22), 5191–5196.

## **ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ АРЕАЛОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ НА ФОНОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

Никитская К. Е.

Институт водных проблем РАН, г. Москва,  
knikitskaya@yandex.ru

Любой ландшафт, как естественный, так и антропогенно измененный, является сложной пространственной системой, функционирование которой определяется характером взаимосвязей ее отдельных компонентов. Система практически реализуется потоками воды, твердого вещества и растворов химических соединений. Подробный анализ динамики таких потоков, вкупе с анализом загрязнений, поступающих в пределы ландшафтных территорий, и ландшафтно-геоморфологическим анализом местности позволяет дать корректную оценку современного экологического состояния территории и потенциальных ее изменений.

Фоновая территория – это удаленный от потенциальных источников загрязнения участок земной поверхности со сходными с контролируемой территорией почвенным покровом, растительностью и характером хозяйственного использования. Обычно считается, что для фоновых территорий не характерны превышения пороговых значений концентраций химических элементов, так как территория не подвержена или слабо подвержена антропогенному воздействию. Но даже если на территории нет источников загрязнения, она все равно подвержена воздействию атмосферных выпадений, которые формируют определенный уровень присутствия многих химических элементов в пределах водосборных бассейнов.

Геолого-геоморфологические условия территории являются важнейшими факторами формирования структуры речных бассейнов. Они определяют направленность и интенсивность природных и антропогенных процессов. Так, геоморфологическими условиями