

Тросников И.В., Куликова И.А.,
Сальников В.Г., Таланов Е.А.,
Турулина Г.К., Полякова С.Е.

**Возможности управления
качеством атмосферного
воздуха в районе
месторождения Кашаган
на основе численного
моделирования**

Trosnikov I.V., Kulikova I.A.,
Salnikov V.G., Talanov E.A.,
Turulina G.K., Polyakova S.E.

**Ability to control air quality in
the kashagan field area by the
use of the numerical simulation**

Тросников И.В., Куликова И.А.,
Сальников В.Г., Таланов Е.А.,
Турулина Г.К., Полякова С.Е.

**Қашаған кен орны ауданында
сандық модельдеу негізінде
атмосфералық ауа сапасын
басқару мүмкіндіктері**

Рассматриваются основные типы региональных моделей и моделей дальнего переноса загрязняющих веществ в атмосфере. Обсуждаются основные подходы к решению уравнений переноса, трансформации и осаждения атмосферных загрязнений и рассматриваются основные методы реализации моделей переноса загрязняющих веществ в атмосфере. Рассматриваются «собственные» выпадения соединений серы и азота на примере работы объектов месторождения Кашаган. Дана характеристика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от основных объектов компании для двух основных сценариев. Для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ использовалась региональная гидродинамическая модель ETA и модель дальнего трансграничного переноса (МДТП) вредных выбросов. Проведены результаты численных расчетов распространения примесей и получены карты пространственного распространения загрязняющих веществ от объектов месторождения Кашаган (с учетом и без учета деятельности Морского комплекса) в пограничном слое атмосферы.

Ключевые слова: перенос загрязняющих веществ, выбросы загрязняющих веществ, распространения примесей, распространения загрязняющих веществ, региональная гидродинамическая модель ETA, модель дальнего трансграничного переноса, пограничный слой атмосферы.

Considering the main types of regional models and models of transboundary transport of pollutants in the atmosphere. To discuss the main approaches to the solution of transport, transformation and fallout of atmospheric pollutants and considering the basic methods of implementing transport models of contaminants in the atmosphere. To consider "own" fallout of sulfur and nitrogen compounds on the example of the facilities of the Kashaganoil deposits. To gave characteristics of pollutant emissions and the atmosphere of the main objects of the company for the two main scenarios. For a estimate transboundary transport of pollutants to used regional hydrodynamic model of the ETA and long-range transboundary transport model (MDTP) emissions. To produce numerical results of pollution spreading and to get a map of the spatial distribution of pollutants from the facilities of the Kashagandeposits (with and without see complex) in the atmospheric boundary layer.

Key words: transport of pollutants, emissions, pollution spreading, the spread of pollutants, regional hydrodynamic model of ETA, a model of cross-border long-distance transport, the boundary layer of the atmosphere.

Атмосферадағы ластаушы заттардың алыстан тасымалдау модельдері мен аймақтық модельдердің негізгі түрлері қарастырылады. Атмосфералық ластанудың шөгуі мен өзгеруінің, тасымалдану теңдеуін шешудің негізгі мәселелері талқыланады және атмосферадағы ластаушы заттардың тасымалдау модельдерін іске асырудың негізгі тәсілдері қарастырылады. Қашаған кен орны нысандарының жұмыс істеу мысалында күкірт пен азоттың қосындыларының (жеке шөгуі) қарастырылады. Екі негізгі сценарийлер үшін компанияның негізгі нысанынан атмосфераға түсетін ластаушы заттардың сипаттамасы берілген. Ластаушы заттарды трансшекаралық тасымалдануын бағалау үшін аймақтық гидродинамикалық ETA моделі және зиянды тасталымдардың алыс трансшекаралық тасымалдау моделі қолданылған. Қоспалардың таралуының сандық есептеу нәтижесі жүргізілген және атмосфераның шекаралық қабатында Қашаған кен орындары нысандарынан ластаушы заттардың кеңістіктік таралу карталары алынған (Теңіздік кешен әрекетін ескеру немесе ескермегенде).

Түйін сөздер: ластаушы заттардың тасымалдануы, ластауыш заттардың тасталымдары, қоспалардың таралуы, ластауыш заттардың таралуы, ETA аймақтық гидродинамикалық моделі, алыс трансшекаралық тасымалдау моделі, атмосфералық шекаралық қабат.

**ВОЗМОЖНОСТИ
УПРАВЛЕНИЯ
КАЧЕСТВОМ
АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА В РАЙОНЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ
КАШАГАН НА ОСНОВЕ
ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Введение

Результаты экологических исследований однозначно свидетельствуют о том, что загрязнение приземной атмосферы – самый мощный, постоянно действующий фактор воздействия на человека, пищевую цепь и окружающую среду. Атмосферный воздух имеет неограниченную емкость и играет роль наиболее подвижного, химически агрессивного и всепроникающего агента взаимодействия вблизи поверхности компонентов биосферы, гидросферы и литосферы.

Следовательно, проблема загрязнения атмосферы токсичными газами и выявление пространственной структуры распределения очагов загрязнения, установление источников вредных воздействий и их влияние на здоровье населения являются важнейшими задачами экологии атмосферы. Особое значение имеют трансграничные аспекты этих процессов. Исследования, выполненные многими авторами [1], доказали, что ряд атмосферных загрязнителей переносятся воздушными массами из одной страны в другую на большие расстояния. При этом они подвергаются химическим превращениям, сухому и влажному осаждению. Изучение этих процессов в явном виде путем организации прямых измерений представляется затруднительным. Источниками загрязняющих веществ, участвующими в трансграничном переносе, являются выбросы промышленных центров, которые формируют значительные по размерам техногенные биогеохимические провинции с аномально повышенным уровнем присутствия широкого спектра загрязняющих веществ в объектах окружающей среды.

Формирующиеся в результате кислотные атмосферные осадки оказывают отрицательное влияние на почвенно-растительный покров, вымывают кальций, гумус и микроэлементы из почв. Кислотные атмосферные осадки рассматриваются сейчас как мощный фактор не только выветривания горных пород и ухудшения качества несущих грунтов, но и химического разрушения техногенных объектов, включая памятники культуры и наземные линии связи. Во многих экономически развитых странах в настоящее время реализуются программы по решению проблемы кислотных атмосферных осадков.

В рамках Национальной программы по оценке влияния кислотных атмосферных осадков, учрежденной в 1980 году, многие федеральные ведомства США начали финансировать исследования атмосферных процессов, вызывающих кислотные дожди, с целью оценки влияния последних на экосистемы и выработки соответствующих природоохранных мер. Выяснилось, что кислотные дожди оказывают многоплановое воздействие на окружающую среду и являются результатом самоочищения (промывания) атмосферы. Основные кислотные агенты – разбавленные серная и азотная кислоты, образующиеся при реакциях окисления оксидов серы и азота с участием пероксида водорода. Аналогичная программа реализуется и в Европейских странах на основе выполнения программы ЕМЕП (Совместная программа наблюдения и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе). Эта программа выполняется на базе Европейской Экономической Комиссии ООН и при поддержке Всемирной Метеорологической Организации.

Решение этих задач необходимо для разработки природоохранных мероприятий, экологического обоснования территориальной организации производства, генеральных планов городов и территориально-производственных комплексов.

В последние годы особую актуальность приобретает изучение трансграничных аспектов распространения загрязняющих веществ в атмосфере вследствие производственной деятельности крупных недропользователей, каковыми являются компании, работающие в сфере добычи и переработки нефти и газа. В ходе производства, использования, хранения, транспортировки химических продуктов формируются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, которые вызывают последствия, проявляющиеся спустя определенный промежуток времени или незамедлительно в районе осуществления соответствующей деятельности или за его пределами. Для выявления и учета в природоохранной деятельности особенностей трансграничного распространения загрязняющих веществ в атмосфере необходимо проводить не только комплексные исследования регионального характера, но и изучать эти процессы для отдельных крупных источников с целью выявления их влияния на окружающую среду.

В данной статье изучались процессы трансграничного распространения загрязняющих веществ в атмосфере на основе математического моделирования, которые поступают в воздушную среду вследствие деятельности крупного нефтегазового месторождения Кашаган.

Месторождение Кашаган расположено в казахстанском секторе Каспийского моря. Объекты включают морской эксплуатационный технологический комплекс и наземную установку комплексной подготовки нефти и газа (УКП-ниГ) «Болашак». Проектная мощность месторождения составит примерно 70 млн. тонн нефти в год, или 1 млн. 500 тысяч баррелей.

Материалы и методы исследования

Наиболее эффективным методом решения задач прогнозирования и мониторинга распространения загрязняющих веществ в атмосфере является математическое моделирование с привлечением современных методов вычислительной математики. Одним из примеров региональных аэрозольных моделей может служить канадская региональная аэрозольно-климатическая модель NARCM (Northern Aerosol Regional Climate Model), которая имеет достаточно грубое горизонтальное разрешение, 1×1 градус, и в зависимости от варианта от 20 до 30 вертикальных уровней. При интегрировании используется 20-минутный шаг. В большинстве же научных групп, ведущих региональные исследования по аэрозольной тематике, применяются модели, в которых имеются специальные аэрозольные блоки, предназначенные для описания аэрозолей определенного типа, а в качестве атмосферного блока используются известные региональные модели. Наиболее широкое применение получили модели ETA и RAMS. В таких моделях горизонтальное разрешение меняется от 5 до 80 км, а число вертикальных уровней от 20 до 30. Можно упомянуть модель Европейско-Средиземноморского Центра ICOD (Insular Coastal Dynamics) для расчета переноса пылевого аэрозоля на основе региональной модели ETA [2] или модели университета Сан Пауло, предназначенной для мониторинга аэрозоля от горения биомассы в регионе Южной Америки [3]. В этой модели используется динамика из модели RAMS. Имеются региональные аэрозольные модели, в которых используются метеорологические

прогностические данные, взятые из глобальных прогностических моделей. Например, в Брукхэвенской национальной лаборатории для моделирования распространения сульфатного аэрозоля (BrookhavenNationalLab. SulfateModeling) используются прогнозы Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF).

В данной работе для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ в атмосфере использовалась численная схема расчета, состоящая из региональной гидродинамической модели атмосферы ETA [2] и модели дальнего и трансграничного переноса (МДТП) вредных выбросов [4-6].

Загрязняющие вещества в атмосфере антропогенного происхождения, имея небольшую концентрацию и заметную пространственно-временную изменчивость, могут влиять на качество воздуха и даже на динамику атмосферы. Для решения задачи изучения распространения загрязняющих примесей в атмосфере следует рассматривать атмосферный воздух как систему, состоящую из нескольких компонент [1]. Для наших целей достаточно принять во внимание три компоненты: сухой воздух с плотностью ρ_d , водяной пар с плотностью ρ_v и загрязняющую примесь с плотностью ρ_i . Пусть i -я компонента с плотностью ρ_i переносится со скоростью V_i и турбулентным потоком T_i . Тогда i -я компонента переносится полным потоком

$$J_i = \rho_i V_i + T_i. \quad (1)$$

Если ввести скорость центра масс (барицентрическую скорость) V всех компонент и суммарную плотность ρ :

$$V = \frac{\sum \rho_i}{\sum \rho_i} \rho = \sum \rho_i \quad (2)$$

то полный поток можно переписать как $J_i = \rho_i V_i + \rho_i \Delta_i + T_i$, где V – диффузионная скорость i -й компоненты.

Обозначим через σ_v производство водяного пара в единицу времени и в единице объема, а через σ_a – производство аэрозоля, тогда уравнение баланса примет вид:

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d V + \rho_d \Delta_d) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v V + \rho_v \Delta_v + \sigma_v) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a V + \rho_a \Delta_a + \sigma_a) = 0, \quad (5)$$

В (3) мы пренебрегаем турбулентностью и эффектами изменения плотности сухого воздуха, а также его источниками.

Учитывая, что $\rho_d \gg \rho_v + \rho_a$, а также то, что скорость переноса водяного пара и аэрозоля могут лишь незначительно отличаться от скорости сухого воздуха, получаем $V = V_d$.

Это равенство скоростей в дальнейшем будет использоваться без оговорок. Уравнения (4) и (5) удобно переписать, введя удельную концентрацию водяного пара $q = \rho_v / \rho_d$ и примеси $\mu = \rho_a / \rho_d$,

$$\frac{\partial \rho_d q}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d q V + \rho_d q \Delta_v + \gamma_v) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_a \mu}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \mu V + \rho_d \mu \Delta_a + \gamma_a) = 0, \quad (7)$$

Модель. Для мониторинга и прогноза распространения примеси используется совместная модель, состоящая из конечно-разностной атмосферной модели ETA и полулагранжевой модели переноса примесей. Атмосферная модель используется для вычисления метеорологических параметров, определяющих динамику переноса таких, как поле ветра, характеристики турбулентности, а также осадки способствующие вымыванию примеси из атмосферы.

Выбор атмосферной модели ETA для вычисления атмосферных параметров связан с тем, что в модели используется вертикальная координата η , введенная Мезингером [7]. Эта вертикальная координата позволяет корректно учитывать орографические эффекты, влияющие на вертикальное движение воздуха, что в свою очередь приводит к более точному прогнозу осадков. С осадками же связан процесс вымывания примеси из атмосферы.

Транспортная модель основана на трехмерной лагранжевой форме уравнения переноса [8]. Для совместимости ее с моделью ETA в ней используются те же вертикальные и горизонтальные координаты

Уравнения модели записаны в сферической системе координат, которая, однако, повернута относительно стандартной так, что через центр области интегрирования проходит экватор и нулевой меридиан. Это позволяет провести

более регулярное покрытие области равномерной сеткой.

Вертикальная координата η определяется как

$$\eta = \eta_s \sigma, \quad \sigma = \frac{P}{P_s}, \quad \eta_s = \frac{P_{ref}(z_s)}{P_{ref}(0)}, \quad (8)$$

где профиль стандартного давления задается следующим образом:

$$P_{ref} = \frac{P_{ref}(0)}{P_{ref}^{g/\gamma_{ref}R}} (T_{ref} - \gamma_{ref}z)^{g/\gamma_{ref}R}, \quad (9)$$

при стандартной температуре на уровне моря $T_{ref} = 288$ К (т.е. при $\eta=1$) и при постоянном вертикальном градиенте температуры $\Gamma_{ref} = 6,5 \cdot 10^{-3}$ К м⁻¹.

Уравнение переноса примеси:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \eta} K_H \frac{\partial \mu}{\partial \eta} + \frac{S_\mu}{\rho}, \quad (10)$$

где $\partial/\partial t$ – материальная производная

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \dot{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta}, \quad (11)$$

где a – радиус Земли, μ – отношение смеси аэрозоля с плотностью ρ_μ , ρ – плотность сухого воздуха, K_H – коэффициент вертикальной турбулентности, и S_μ – источниковый член.

При полулагранжевом методе интегрирования (10) на первом этапе необходимо определить траектории воздушных частиц, пришедших в каждую точки сетки модели: т.е. определить точки, в которых эти частицы находились в момент $t - \Delta t$.

Они определяются решением уравнений:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{V}, \quad (12)$$

где $\mathbf{X}=(x, y, \eta)$ – радиус вектор воздушной частицы, а $\mathbf{V}=(u, v, \dot{\eta})$ – скорость ветра в этой точке. Уравнение (12) интегрируется при начальных условиях:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_a \quad (13)$$

где $\mathbf{X}_a$ – точка прибытия воздушной частицы, т.е. точка модельной сетки. Система интегрируется по схеме Кранка-Никольсона [9]:

$$\mathbf{X}_d(t - \Delta t) = \mathbf{T}(t) - \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{V}_a(t) + \mathbf{V}_d(t - \Delta t)), \quad (14)$$

где Δt – шаг по времени. Индекс a относится к известным точкам прибытия воздушных частиц, индекс d относится к неизвестным точкам отправления, которые могут быть определены итерациями. Второй этап состоит в вычислении отношения смеси в точке отправления воздушной частицы и поправки этого значения на источник в точке прибытия воздушной частицы (точка сетки):

$$\mu_a(t) = \mu_a(t - \Delta t) + \frac{\Delta t S_\mu}{\rho}. \quad (15)$$

Неизвестные значения компонента поля ветра, параметров диффузии и значения отношения примеси в точке отправления получают с помощью квази-монотонной, локальной, кубической сплайн-интерполяции [10].

В транспортной модели используются следующие граничные условия:

- через внешнюю границу приток примеси отсутствует;
- на внутренних орографических границах, где поток воздуха отсутствует, поток примеси также отсутствует;
- на поверхности поток примеси вычисляется исходя из распределения очагов выбросов загрязнения, их площади;
- на верхней границе поток примеси равен нулю.

Член источников S_μ включает процессы вымывания примеси осадками, скорость которого задается:

$$R = S \frac{dP}{dt}, \quad (16)$$

где dP/dt – интенсивность осадков (в см/час), и $S=1$ см⁻¹.

Интерполяция. Хорошо известно, что при лагранжевом, или как в нашем случае полулагранжевом, методе интегрирования уравнения переноса значительно ослабляется условие на соотношение шагов по пространству и времени. В этом методе, как правило, для устойчивого счета допускаются значительно большие шаги по времени по сравнению с эйлеровым подходом. В тоже время требуется точные методы многомерной интерполяции. В модели переноса для этой цели используется тензорное

произведение одномерных интерполяций. В одномерном случае рассмотрим два типа интерполяции: линейную и кубическую (рис. 1).

На рисунке 1а на интервале $[x_1, x_2]$ заданными значениями функции на концах f_1 и f_2 при линейной зависимости $f(x)=a*x+b$ получаем интерполяционную формулу:

$$f(x) = f_1 + \frac{x-x_1}{x_2-x_1}(f_2 - f_1). \quad (17)$$

Для получения кубической интерполяции число узлов с заданными значениями функции следует увеличить, как это показано на рисунке 1б.

Тогда кубическая интерполяция на интервале $[x_2, x_3]$ задается полиномом третьей степени:

$$f(x) = a(x - x_2)^3 + b(x - x_2)^2 + c(x - x_2) + d \quad (18)$$

где $x \in [x_2, x_3]$. Легко вычислить производную $f'(x)$:

$$f'(x) = 3a(x - x_2)^2 + 2b(x - x_2) + c \quad (19)$$

Если производные на концах интервала $[x_2, x_3]$ оценить, используя конечные разности [9], получим четыре условия для определения коэффициентов полинома кубической интерполяции, которая является более точной по сравнению с линейной. К сожалению, такая интерполяция немонотонна, что может приводить к паразитарным осцилляциям. Для подавления этого эффекта используется метод, предложенный в работе [10].

Сохранение массы аэрозоля. Для сохранения массы аэрозоля при адвективном переносе, что является обязательным условием, применяется алгоритм, основанный на идеи коррекции потоков (the flux corrected transport (FCT)), предложенный Пристли [11]. Идея состоит в том, что при расчете переноса аэрозоля при условии отсутствия потоков на границах для двух временных моментов t и $t-\Delta t$ требуется сохранение интеграла массы аэрозоля:

$$\int_V \chi^M(t) \rho(t) dx dy dz = C, \quad (20)$$

где χ^M – решение уравнения переноса, получаемое для каждой точки сетки из линейной

комбинации решений χ^H , получаемого с использованием интерполяции высокого порядка (кубической) и χ^L , получаемой по линейной интерполяции:

$$\mu_k^M = \alpha_k \mu_k^H + (1 - \alpha_k) \mu_k^L$$

$$0 \leq \alpha_k \leq 1$$

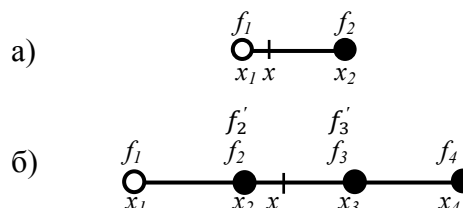


Рисунок 1 – Шаблоны одномерной сетки для линейной интерполяции (а) и для кубической интерполяции (б)

В статье Пристли предлагается также эффективный алгоритм нахождения α_k путем минимизации различия между χ^M и χ^H .

Совместная модель

Совместная модель атмосферы и переноса примеси была создана для мониторинга распространения продуктов горения биомассы над территорией Южной Америки.

Для вычисления переноса примесей в атмосфере необходимо знать трехмерное поле ветра, температуру, геопотенциал, осадки и параметры вертикальной турбулентности. Эти элементы получаются из мезомасштабной атмосферной модели. Для этой цели используется модель ETA с пространственным шагом около 30 км и 45 уровнями по вертикали. При интегрировании атмосферной модели с шагом 96 с через каждые 48 мин модельного времени, включается модель переноса, в которой используются текущие атмосферные параметры для вычисления эволюции примеси за истекший период времени. После этого счет атмосферной части продолжается.

Совместная модель атмосферы и переноса аэрозоля. На рисунке 2 представлена схема информационного обеспечения и функционирования совместной модели.

Распределение пожаров за прошедшие сутки, полученное с орбитальных ИСЗ, и

хранимые в локальной базе на дисках, обрабатываются для привязки к сетке модели. Вторым источником информации являются глобальные анализы и прогнозы NCEP. Эти данные также используются для формирования начальных данных на сетке модели (анализ) и граничных условий (прогноз). После этого начинается синхронное интегрирование атмосферной модели и модели переноса.

На рисунке 3 представлена схема ежедневного счета совместной модели. На оси абсцисс указано модельное время в днях (D), а на ординате реальное время. В таком цикле для каждого реального дня проводился расчет переноса аэрозоля за предыдущие сутки, т.к. за эти сутки известно распределение очагов пожаров. В качестве начального распределения аэрозоля используется результат предыдущего расчета. Это мы называем мониторингом распространения аэрозоля. Продолжение расчета на следующие модельные сутки является прогнозом, т.к. это время еще не наступило.

Такой цикл можно начинать с отсутствия аэрозоля в атмосфере. Учитывая, что время жизни в атмосфере такого аэрозоля составляет

несколько суток, то после повторения цикла расчетов распределение примесей определяется только распределением пожаров, а не начальным состоянием, с которого этот процесс начался.

Входными данными для модели являются поля геопотенциала, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, температуры на 10 стандартных изобарических поверхностях (1000-100 гПа) и поля относительной влажности на 6 нижних поверхностях (1000-300 гПа).

Проведена адаптация региональной гидродинамической модели ETA к глобальным метеорологическим данным, а также подготовка параметров подстилающей поверхности, включающие орографию для выбранных регионов и настройку ее к региону, центром которого является месторождение Кашаган с координатами 52° с.ш. и 46,5° в.д. Поскольку пространственный шаг расчетной сетки составляет 0,33°, а вертикальный шаг – 400 м, то все объекты Морского комплекса (МК) привязываются к одному узлу расчетной сетки, и выбросы от каждого из источников ЗВ интегрально суммируются.

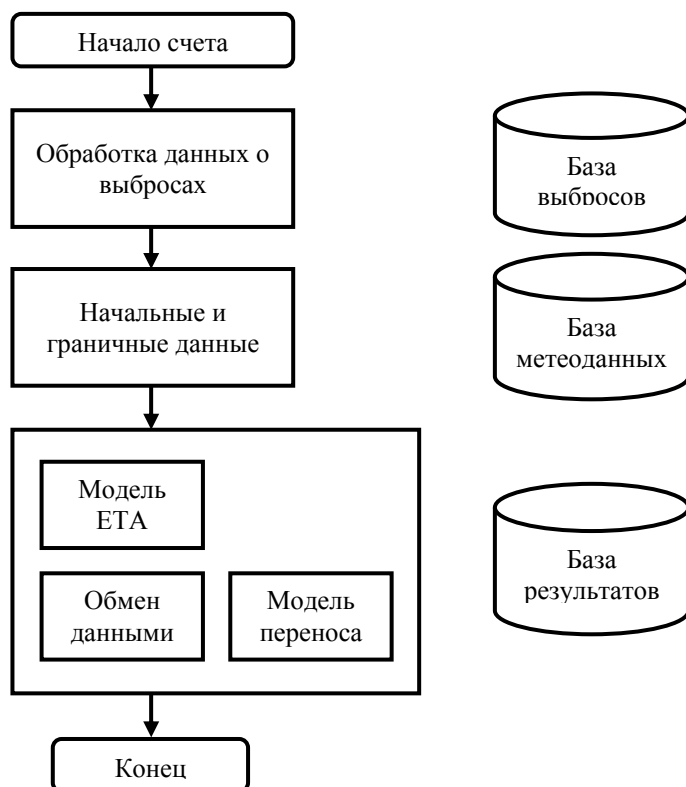


Рисунок 2 – Блок-схема совместной модели атмосферы и переноса примеси

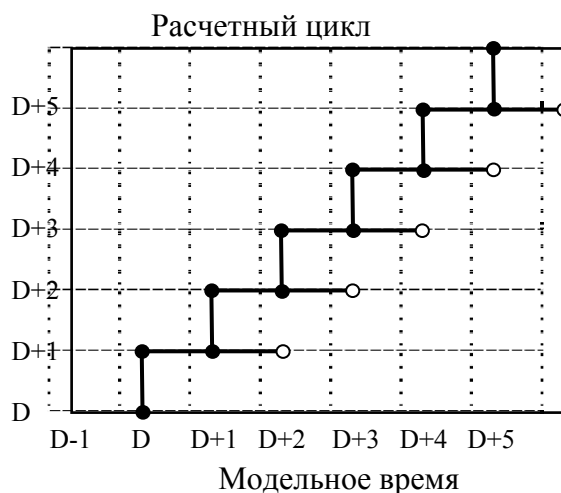


Рисунок 3 – Схема мониторинга и прогноза по совместной модели

Созданный архив исходных данных, охватывающий годовой период с дискретностью 6 часов, позволяет давать прогноз полей метеорологических величин по модели ЕТА на сроки до 48 ч., используя регулярно меняющиеся граничные условия.

Реализованная технология расчета переносов ЗВ рассчитана на дискретность вычислений с временным шагом 48 мин. и состоит в следующем шагах:

1. Выбор начального срока.
2. Выброс ЗВ интенсивностью мг/48 мин.
3. Счет по модели ЕТА на один временной шаг вперед.
4. Вычисления по модели МДТП переноса ЗВ для каждого узла модели ЕТА.
5. Осреднение данных за месяц и год.

Шаги 2-4 повторяются 60 раз, таким образом, заблаговременность прогноза будет составлять 48 часов. Для одного месяца имеем 15 просчетов, то есть начальный срок расчета выбирается кратный двум от начала месяца. В результате таких расчетов имеем таблицу расп-

ространения ЗВ за заданный месяц и сезоны. Для каждого месяца и сезона получаются три рисунка: распространение определенного ЗВ у Земли, на высоте 900 м, 700 м и 200 м.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований получены карты пространственного распространения осредненного по сезонам диоксида азота NO_2 и диоксида серы SO_2 размерностью в $\text{г} \cdot 10^{-12}/\text{м}^3$ (пикограммах на метр кубический) с учетом и без учета деятельности Морского комплекса. Концентрация сероводорода H_2S по сравнению с концентрациями диоксида азота NO_2 и диоксида серы SO_2 – не значительные. Расчетный регион, расположенный в пределах от 35°N до 65°N и от 25°E до 85°E , обведен сплошными линиями. На рисунке нанесены города Астана, Москва и Ак-тюбинск, под рисунком располагается цветовая шкала концентраций. На рисунке 4 приведен пример представления результатов моделирования для уровня 350 метров.

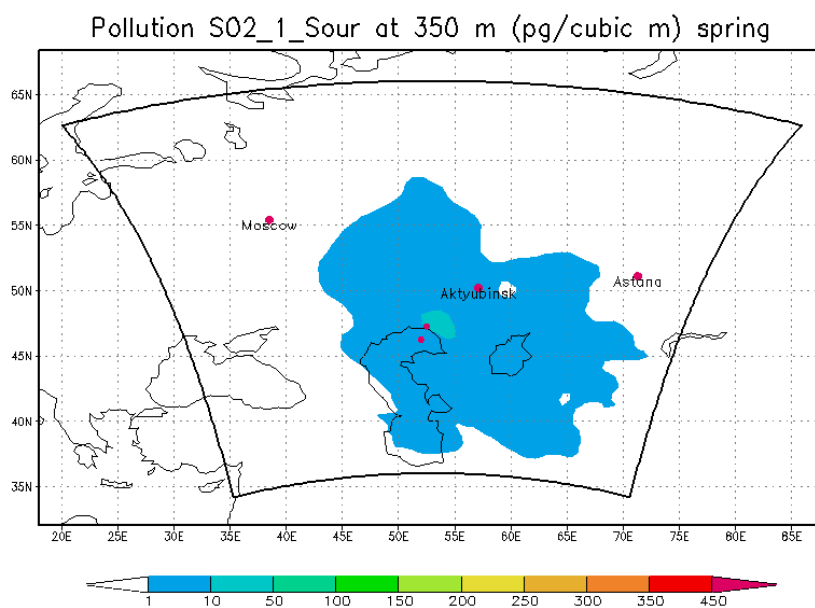


Рисунок 4 – Особенности трансграничных потоков SO_2 весной на различных высотах в пограничном слое атмосферы без учёта выбросов морского комплекса (МК)

Рассмотрим основные особенности трансграничного переноса ЗВ на примере пространственного распределения концентрации диоксида азота NO_2 . Наиболее значительные концентрации диоксида азота NO_2 во все сезоны наблюдаются в

нижнем 200-метровом слое. В летнее время концентрация загрязняющих веществ на уровне 60 метров в районе источников составляет около 450 и 350 единиц соответственно с учетом и без учета деятельности Морского комплекса. В то же

время ареал распространения ЗВ на уровне 60 метров – не значительный и охватывает в основном районы, прилегающие к источникам. В зоне загрязнения оказывается акватория Каспийского моря, северо-западная часть Казахстана (включая Аральское море) и западная часть Туркмении и Узбекистана. В связи с преобладанием на территории Казахстана в летнее время антициклонической циркуляции, с юго-восточными ветрами ЗВ выносятся также на юг России. На нижней Волге на уровне 60 м концентрация ЗВ составляет примерно 200 и 100 единиц соответственно с учетом и без учета деятельности Морского комплекса. Зона загрязнения (до 50 и 100 единиц) захватывает территорию Саратовской области.

На уровне 200 м ареал распространения ЗВ, особенно, в северо-западном и восточном направлениях увеличивается. Над северной столицей России концентрация ЗВ составляет примерно 10 единиц, такой же уровень загрязнения прослеживается и над Ханты-Мансийским автономным округом. На уровне 350 метров формируется общая картина трансграничного переноса ЗВ в тропосфере. Ареал распространения вредных примесей охватывает почти всю территорию европейской России, Урала, Западной Сибири, Казахстана, Узбекистана и Туркмении. На уровнях 500 и 1000 метров концентрация ЗВ уменьшается, а границы зоны их распространения лишь чуть-чуть смещаются в северном и восточном направлениях. При исключении Морского комплекса уровень загрязнения уменьшается (в среднем примерно на 50-100 единиц). В нижнем 200-метровом слое из зоны загрязнения выпадают западные районы европейской территории России. Роль морского комплекса прослеживается и на уровне 350 метров, – на северо-западе европейской России и на территории Ханты-Мансийского автономного округа ареал распространения ЗВ суживается, – здесь прослеживаются лишь небольшие пятна, связанные с деятельностью наземного комплекса. На уровне 500 и 1000 метров действие Морского комплекса сказывается, прежде всего, в прибрежных районах Казахстана и Туркмении, а также на севере, северо-востоке Казахстана и в Узбекистане, где концентрация ЗВ примерно на 50 единиц увеличивается. Ареал распространения ЗВ при учете Морского комплекса расширяется в северном и восточном направлениях.

Осенью концентрация ЗВ в слое 200 метров по сравнению с летним периодом уменьшается и составляет на уровне 60 метров в районе действия источника с учетом (до 350 единиц) и без учета (до 250 единиц) действия Морского комплекса. Данное обстоятельство, возможно, связано с неустойчивостью атмосферной циркуляции в осенний период и вымыванием вредных примесей в процессе выпадения осадков. В то же время трансграничный перенос на уровне 200 метров усиливается. На уровне 350 метров происходит дальнейшее расширение зоны загрязнения в северном и восточном направлениях. В зону действия источников, так же как и в летнее время, попадает большая часть территории европейской России, Западной Сибири, Казахстана, Узбекистана и Туркмении. Над северной территорией европейской России и Западной Сибири концентрация вредных примесей увеличивается до 50 и 10 единиц соответственно с учетом и без учета деятельности Морского комплекса. Над северной столицей и Ханты-Мансийским АО концентрация ЗВ по сравнению с летним периодом увеличивается до 50 единиц. На уровне 500 и 1000 метров основной перенос в осеннее время направлен на север и восток. Влияние источников загрязнения на европейскую территорию России – менее значительное, чем в летнее время. Действие Морского комплекса на данных уровнях сказывается в увеличении концентрации ЗВ над Центрально-черноземным районом европейской России, территорией Западной Сибири, Казахстана и Узбекистана.

В зимнее время на нижних уровнях (до 200 метров) экологическая картина существенно не меняется. Концентрация загрязняющих веществ на уровне 60 метров в районе действия источника, также как и осенью, достигает 350 и 250 единиц соответственно с учетом и без учета действия Морского комплекса. Характерной особенностью зимнего периода является усиление влияния источников на уровне 350 метров на европейскую территорию России и Урал. Над российской столицей на уровне 350 метров концентрация загрязняющих веществ возрастает почти до 50 и 100 единиц соответственно с учетом и без учета Морского комплекса. Влияние Морского комплекса прослеживается практически на всех уровнях, – при работе комплекса концентрация ЗВ увеличивается, а ареал их распространения расширяется в основном в

северном и восточном направлениях. На уровне 1000 метров влияние Морского комплекса менее значительное.

Весной концентрация ЗВ в нижнем 200-метровом слое по сравнению с зимним периодом увеличивается. На уровне 60 метров концентрация ЗВ веществ в районе действия источников составляет, так же как и летом, около 450 и 350 единиц соответственно с учетом и без учета действия Морского комплекса. По сравнению с зимним периодом ареал распространения ЗВ на нижнем уровне расширяется в сторону Узбекистана и Туркмении. Примерно на 100 единиц (с 50 до 150) повышается концентрация ЗВ за счет действия Морского комплекса нижней Волге. На уровне 200 метров влияние Морского комплекса сказывается в появлении зоны загрязнения над Ханты-Мансийским а. о. и крайними северными районами европейской России. На уровне 350 метров, так же как и в другие сезоны, ареал распространения ЗВ расширяется, прежде всего в северном и восточном направлениях. Влияние Морского комплекса прослеживается как в увеличении концентрации ЗВ, так и в расширении ареала их распространения. На уровне 500 метров ареал распространения практически не меняется, однако концентрация ЗВ, прежде всего в районах действия источников, уменьшается. На уровне 1000 метров влияние Морского комплекса сказывается в уменьшении концентрации ЗВ над западными районами европейской территории, а также над нижней Волгой и северо-западом Казахстана.

Для диоксида серы SO_2 концентрации – менее значительные и не превышают во все сезоны в пределах рассматриваемой территории 50 единиц. На уровне 350 м ареал распространения ЗВ охватывает европейскую территорию России, большую часть территории Урала, Западной Сибири, Казахстана, Узбекистана и Туркмении. Влияние морского комплекса прослеживается во все сезоны на всех уровнях и выражается, прежде всего, в расширении зоны загрязнения на севере и восток.

Современная система контроля вредных пылегазовых выбросов в атмосферу в Казахстане и в других странах СНГ основана на принятой еще в СССР концепции о том, что выбросы любого предприятия в суммировании с одноименными выбросами других предприятий данного региона не должны превышать на

уровне дыхания так называемых «Предельно допустимых концентраций» (ПДК). На основе медико-биологических исследований разработан широкий набор значений ПДК для разнообразных веществ и соединений, распространяющихся от источников выбросов в атмосфере.

Принятая система контроля ограничена непосредственным воздействием выбросов источников данного региона на атмосферу данного региона. При этом, действующее законодательство не требует сведений баланса выбросов, хотя практически всегда свыше 50% выбросов в любом регионе уносится за его пределы, осаждаясь в других районах, отстоящих от источников на многие сотни и тысячи километров. В этом случае рассеивание выбросов столь велико, что их концентрации много ниже установленных норм ПДК и, следовательно, не оказывают заметного влияния на загрязнение собственно атмосферы в районах дальнего переноса.

Вместе с тем, время нахождения в атмосфере в случае дальнего переноса становится значительным (десятки часов и до нескольких суток) и первичные выбросы окислы серы и азота взаимодействуют в атмосфере под влиянием ультрафиолетовой части солнечного излучения, образуя сложную гамму азотно-сернистых соединений. Указанные соединения в сухом виде (ряд из них образует аэрозоли) и во влажном (кислотные дожди) выпадают на почву, леса, здания, сооружения и т.п. Этот вид загрязнений как в Казахстане, так и во всем СНГ в настоящее время не нормируется и не контролируется.

Необходимо отметить, что процессы мелкомасштабной турбулентной диффузии, сухого осаждения, вымывания примесей могут в какой-то степени повлиять на основной перенос. Их интенсивность зависит от состояния атмосферы – стратификации, наличия восходящих или нисходящих воздушных токов, количества и интенсивности осадков. Но, в конечном счете, мезомасштабные процессы формируются на фоне крупномасштабных. Поэтому необходим комплексный анализ трансграничных потоков загрязняющих веществ в различном масштабе.

Выводы

В данной работе на первом этапе исследования собраны и обобщены сведения о состоянии

воздушной среды в районах расположения основных объектов месторождения Кашаган (МК). На основе климатических данных проанализированы и представлены в удобном для машинной обработки виде данные об объемах валовых выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) при эксплуатации установки подготовки нефти и последующих этапах освоения (УПН ПЭО), а также о количестве выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при эксплуатации объектов Морского комплекса.

На втором этапе исследования подготовлены массивы исходных данных по заданному региону для проведения численных расчетов. В качестве входных данных в модели использовались поля геопотенциала, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, температуры на 10 стандартных изобарических поверхностях (1000-100 гПа) и поля удельной влажности на 6 нижних поверхностях (1000-300 гПа). Особое внимание при этом уделялось подготовке репрезентативных гидрометеорологических данных для расчета трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере. Проведена верификация численной схемы расчетов, состоящей из региональной гидродинамической модели ETA и модели дальнего и трансграничного переноса (МДТП) вредных выбросов.

И, наконец, на третьем заключительном этапе исследования в результате численных экспериментов получены карты пространственного распространения загрязняющих веществ от объектов месторождения Кашаган (с учетом и без учета деятельности Морского комплекса) в пограничном слое атмосферы (на уровнях 60, 200, 350, 500 и 1000 м) и выделены зоны с наиболее высокой концентрацией. На основе анализа результатов моделирования был сделан вывод, что оценки концентрации выбросов загрязняющих веществ от объектов месторождения Кашаган на территории Казахстана, а также их трансграничного переноса на территорию сопредельных государств намного ниже установленных международными стандартами уровней предельно допустимой концентрации (ПДК).

Вышеизложенное позволяет сделать следующие основные выводы. Годовой ход концентрации загрязняющих веществ характеризуется хорошо выраженными максимумами в весенне-летний период и минимумами в осенне-зимнее время. Данное обстоятельство, возможно, связано с более развитой турбулентностью и неустойчивостью атмосферных процессов зимой и осенью, с частыми выходами циклонов на территорию Казахстана и преобладанием антициклонических типов атмосферной циркуляции в летнее время. В слое до 350 м максимальные значения концентрации загрязняющих веществ отмечаются в районе источников. С высотой концентрация загрязняющих веществ резко уменьшается, тогда как ареал распространения выбросов увеличивается. В приземном слое атмосферы (ниже 200 м) трансграничный перенос ограничивается районами нижней и средней Волги, а также близлежащими районами Казахстана, Узбекистана и Туркмении. На уровне 350, 500 и 1000 м основные потоки ЗВ направлены на север и восток. В связи с этим наиболее сильное влияние, с точки зрения загрязнения атмосферного воздуха, объекты Компании оказывают на северо-запад Казахстана, нижнюю и среднюю Волгу (включая Саратовскую область), запад Туркмении и Узбекистана. Под влиянием Морского комплекса концентрация ЗВ и ареал их распространения, как правило, увеличиваются. Во всех рассмотренных случаях уровень концентрации ЗВ ниже предельно допустимой концентрации (ПДК).

С целью получения наиболее полных результатов и ясной картины загрязнения воздуха региона крайне необходимо дополнить проведенное исследование изучением локального загрязнения атмосферного воздуха территории месторождения и прилегающих районов вблизи земной поверхности, а также оценить степень загрязнения земной поверхности вследствие вымывания вредных примесей атмосферными осадками.

Литература

- 1 Тросников И.В. Модель переноса примесей // Сборник научных статей «80 лет Гидрометцентру России» / Под ред. Р.М. Вильфанда. – 2010. – С. 336-349.
- 2 Trosnikov Igor, Gielow Ralf, Joro Andrade de Carvalho Jr, Carlos Alberto GurgelVeras, Ernesto Alvarado, David Victor Sandberg, Jose Carlos dos Santos. Modelagem do transporte atmosférico de CO₂ resultante da queimada de biomassa de fonte isolada do Norte de Mato Grosso // XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, de 4 a 9 de agosto de 2002. – Foz de Iguaçu-PR, 2002. – PP. 2094-2098.

- 3 Degtiarev A.I., Shtyreva N.V. Long range modelling of pollutant substances in the atmosphere // *Air Pollution Modeling and its Application XIII*. – New York: Kluwer Academic/Plemum Publisher, 2000. – PP. 741-742.
- 4 Trosnikov I.V., Nobre C.A. Estimation of aerosol transport from biomass burning areas during the SCAR-B experiment // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – N. 103. – PP. 32129-32137.
- 5 Trosnikov I.V., Nobre C.A., Chou S.C. Modelagem do Transporte Atmosferico de Produtos da Queimada de Biomassa // *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, de 16 a 20 de Outubro de 2000. – Foz de Iguaçu-PR, 2000. – PP. 2938-2945.
- 6 Trosnikov Igor, Chou Sin Chan and Nobre Carlos. A Coupled Transport-Eta Mesoscale Model // *I Scientific Conference of LBA*, June 25-28, 2000. – Belem Para, 2000. – PP. 1025-1029.
- 7 Mesinger F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric model // *Riv. Meteor. Aeronaut.* – 1984. – N 44. – PP. 195-202.
- 8 Brasseur G.P., Madronich S. Chemistry-transport models in Climate system modeling, edited by K. E. Tremberth // *Chapter 15*. – Cambridge, University Press, 1992.
- 9 Williamson D., Rasch P. Two dimensional semi-Lagrangian transport with shape-preserving interpolation // *Monthly Weather Review*. – 1989. – N 117. – PP. 102-109.
- 10 Bermejo R., Staniforth A. The conversion of semi-Lagrangian advection schemes to quasi-monotone schemes // *Monthly Weather Review*. – 1992. – N 120. – PP. 2622-2632.
- 11 Priestley A. A quasi-conservative version of the semi-Lagrangian advection scheme // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 1993. – Vol. 121. – PP. 621-629.

References

- 1 Trosnikov I.V. Model perenosaprimesej // *Sbornik nauchnykh statej «80 let Gidrometcentru Rossii»* / Pod red. R.M. Vilfanda. – 2010. – S. 336-349.
- 2 Trosnikov Igor, Gielow Ralf, Joro Andrade de Carvalho Jr, Carlos Alberto Gurgel Veras, Ernesto Alvarado, David Victor Sandberg, Jose Carlos dos Santos. Modelagem do transporte atmosferico de CO₂ resultante da queimada de biomassa de fonte isolada do Norte de Mato Grosso // *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, de 4 a 9 de agosto de 2002. – Foz de Iguaçu-PR, 2002. – PP. 2094-2098.
- 3 Degtiarev A.I., Shtyreva N.V. Long range modelling of pollutant substances in the atmosphere // *Air Pollution Modeling and its Application XIII*. – New York: Kluwer Academic/Plemum Publisher, 2000. – PP. 741-742.
- 4 Trosnikov I.V., Nobre C.A. Estimation of aerosol transport from biomass burning areas during the SCAR-B experiment // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – N. 103. – PP. 32129-32137.
- 5 Trosnikov I.V., Nobre C.A., Chou S.C. Modelagem do Transporte Atmosferico de Produtos da Queimada de Biomassa // *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, de 16 a 20 de Outubro de 2000. – Foz de Iguaçu-PR, 2000. – PP. 2938-2945.
- 6 Trosnikov Igor, Chou Sin Chan and Nobre Carlos. A Coupled Transport-Eta Mesoscale Model // *I Scientific Conference of LBA*, June 25-28, 2000. – Belem Para, 2000. – PP. 1025-1029.
- 7 Mesinger F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric model // *Riv. Meteor. Aeronaut.* – 1984. – N 44. – PP. 195-202.
- 8 Brasseur G.P., Madronich S. Chemistry-transport models in Climate system modeling, edited by K. E. Tremberth // *Chapter 15*. – Cambridge, University Press, 1992.
- 9 Williamson D., Rasch P. Two dimensional semi-Lagrangian transport with shape-preserving interpolation // *Monthly Weather Review*. – 1989. – N 117. – PP. 102-109.
- 10 Bermejo R., Staniforth A. The conversion of semi-Lagrangian advection schemes to quasi-monotone schemes // *Monthly Weather Review*. – 1992. – N 120. – PP. 2622-2632.
- 11 Priestley A. A quasi-conservative version of the semi-Lagrangian advection scheme // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 1993. – Vol. 121. – PP. 621-629.