

Построение прогнозных моделей развития экологических событий с учетом данных дистанционного зондирования Земли из космоса

С.А. Втюрин, Н.А. Князев

*Институт космических исследований РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: nknyazev@iki.rssi.ru*

Рассмотрены вопросы построения прогнозных моделей развития экологического состояния окружающей среды с использованием материалов аэрокосмической съемки с отображением данных на цифровой топографической основе на примере модели разлива нефтяного пятна на водной поверхности. Разрабатываемая модель строится на основе картографической информации, оперативных дистанционных (спутниковых и/или самолетных) данных о форме пятна нефтепродукта, априорной (наземной) информации о характеристиках (вид нефтепродукта, источник загрязнения, метео- и гидрологические данные) загрязнения. Представляемая прогнозная модель позволяет получать прогноз распространения и движения нефтяного пятна на водной поверхности под действием ветра и течений с учетом вида нефтепродукта.

Постановка задачи

Эта работа является логическим продолжением, представленного на прошлой конференции доклада "Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для прогнозного моделирования экологической обстановки", и рассматривает процесс прогнозного моделирования и построения соответствующих алгоритмов с разработкой необходимого программного обеспечения на примере модели разлива нефтяного пятна и его движения под действием ветра и течений.

Формальная постановка задачи может быть представлена следующим образом: построение прогнозных моделей развития экологической ситуации на примере моделирования распространения нефтяных пятен на водной поверхности с использованием информации дистанционного зондирования (авиационной, спутниковой) и дополнительных данных наземных измерений и априорной информации о параметрах нефтезагрязнения с точностью достаточной для целей экологического моделирования и возможностью представления результатов в виде цифровой карты в составе геоинформационной системы (ГИС).

Область применения

Модель предназначена для предупреждения и ликвидации загрязнения водных объектов и прибрежной территории от загрязнений нефтью и нефтепродуктами. Способствует выработке превентивных мер по обеспечению экологической безопасности и сокращению возможных ущербов от аварийных разливов нефтепродуктов.

Существующие аналоги

Среди известных аналогов разрабатываемой системы стоит отметить прогнозную модель Seatrack Web 2.0 Шведского института метеорологии и гидрологии ([SMHI](http://www.smhi.se) <http://www.smhi.se>), являющаяся развитием разработанной в 1970 году в том же институте модели прогноза дрейфа нефтяных пятен на Балтийском море [1].

Некоторые важные особенности этой модели:

- использованы современные данные о процессах эрозии, включая эффекты, зависящие от вязкости нефти; учтено турбулентное рассеивание в трех измерениях;

- использован аналитический алгоритм расчета траекторий дрейфа с учетом ледяного покрова и создаваемых им эффектов;
- использован большой список видов нефти, связанных с Балтийским морем, который может быть дополнен при необходимости;
- производится подробный учет береговой линии с реалистичным взаимодействием между дрейфующим веществом и берегом.
- реализован современный геоинформационный интерфейс с возможностью представления результатов непосредственно в графическом виде.

Система ориентирована на обеспечение района Балтийского моря и восточной части Северного моря. На карте также могут быть отображены границы государств, а также может быть легко добавлена другая дополнительная информация.

Примером аналитического подхода к решению подобной задачи может служить приведенный в [2] набор зависимостей, описывающий распространение нефтяных пленок с учетом вязкости, типа нефтепродукта, направления и скорости ветра и течения и позволяющий проводить расчет и радиуса и формы, а также распространения нефтяного пятна.

Допущения и ограничения

Разрабатываемая модель переноса нефти по водной поверхности, учитывает механизмы вязко-гравитационного растекания и дрейфа (от течений и ветра) растекающегося объема вязкой несжимаемой жидкости- нефтепродукта.

В модели используются следующие допущения:

- скорость вязкостно-гравитационного растекания равномерна, т.е. не изменяется от уменьшения "толщины пленки";
- каждому объему нефтепродукта определенной марки соответствует свой предельный радиус или предельная площадь растекания;
- используемый для расчетов фрагмент цифровой карты с данными о загрязнении должен обеспечивать пространство для моделирования в интересующий период.
- исходя из постановки задачи, моделирование производится с коррекцией любых возможных допусков и неточностей по схеме "на худший случай".
- границами области определения модели являются границы водоема, при этом в соответствии с предыдущим пунктом, не учитываются возможные потери вещества при соприкосновении с берегом или иными препятствиями.

Исходные данные

В качестве исходных данных для моделирования могут быть использованы:

- изображения, полученные с различных спутников (NOAA, TERRA, AQUA, LANDSAT, SPOT и др.) в том числе радиолокационные изображения PCA (ERS, Envisat ASAR);
- изображения, полученные при аэросъемке (размеры, форма пятна, оценка толщины нефтяной пленки);
- доступные для выбранных событий и районов аэрокосмической съемки наземные измерения (скорости и направления ветра и течения);
- дополнительные данные с места события (характер разлива, емкость источника, размер «дыры» источника загрязнения с оценкой объемов и длительности разлива вещества и др.).

Исходная математическая модель

Математической основой расчета, использованной как основа данной модели, является формализация изменения радиуса вязкостно-гравитационного растекания нефтепродуктов по водной

поверхности выполненная по формуле Букмастера [2, 4]:

$$R(t) = 1,76 \cdot (g \cdot \delta)^{\frac{1}{4}} \cdot V^{\frac{1}{3}} \cdot \gamma^{-\frac{1}{8}} \cdot t^{\frac{3}{8}} \quad (1)$$

где $R(t)$ - радиус растекания во времени, м;

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$\delta = 1 - \frac{\rho_H}{\rho_B};$$

ρ_H - плотность нефтепродуктов, г/см³;

ρ_B - плотность воды, г/см³;

V - объем вылива, м³;

γ - кинематический коэффициент вязкости воды, $\gamma = \alpha \cdot 10^{-6}$, м²/с;

α - температурный коэффициент;

t - время в секундах (с) (по лучу).

Имеется также зависимость, определяющая влияние морского течения и скорости ветра на распространение пятна. В первом приближении, согласно [3, 5], суммарная скорость равна векторной сумме скорости $+U_t$ морского течения и ветрового дрейфа U_B .

$$\frac{dx}{dt} = U_B + U_t = 0.33 \cdot U_{\text{ветра}} + U_t \quad (2)$$

Однако данная модель не может быть применена в чистом виде для решения поставленной задачи, так как не учитывает сложной формы нефтяных пятен, и требует осуществления поправок на ветер, течение и возможные препятствия.

Алгоритм прогнозного моделирования

Основной идеей алгоритма моделирования, позволяющей обрабатывать данные, содержащие нефтезагрязнения в виде сложных (неодносвязных, множественных, сложной формы) областей является обработка растрового представления рассматриваемой области в виде загруженного в качестве исходных данных фрагмента цифровой карты с нанесенными на нем при помощи условных цветов слоями нефтезагрязнения и препятствий.

Моделирующий алгоритм строится по классическому итерационному принципу так, что на каждом шаге, представляющем из себя фиксированный момент модельного времени, получается полноценный промежуточный результат, являющийся, одновременно, исходными данными для последующей итерации.

Учитывая конечность возможной точности растрового представления, а также то, что данная точность фактически является предельной (т.к. в качестве основы для такой карты предполагается использование исходного космического снимка), нецелесообразным представляется использование фиксированных шагов по времени, что привело бы в общем случае к потере точности результатов, имеющих растровое представление. Поэтому выбрана модель расчета, при которой шаг итерации определяется процедурой, строящей изменение формы и размера нефтяного пятна вследствие его растекания, а также дрейфа под действием ветра и течения. Построение изменений производится на основе размеров и конфигурации пятна, имеющих на данном шаге итерации, при помощи применения двумерного фильтра с маской, соответствующей размытию по Гауссу, дополненного пороговой функцией. Такой подход, в отличие от вычислений с использованием векторных моделей данных, позволяет автоматически учесть сложные конфигурации нефтезагрязнений, применяя фактически стандартные алгоритмы фиксированной сложности. В случае необходимости производится учет обхода пятном различных препятствий или границ водоема. Изменение площади, полученного таким образом пятна, позволяет рассчитать точное значение текущего модельного времени.

Таким образом, для финальной итерации модельное время может отличаться от заданного пользователем запроса, но не более чем на величину одного шага моделирования. Причем данное отличие позволяет повысить достоверность отображенного графического представления результата моделирования.

Общая структура алгоритма прогнозного моделирования представлена на рис. 1.

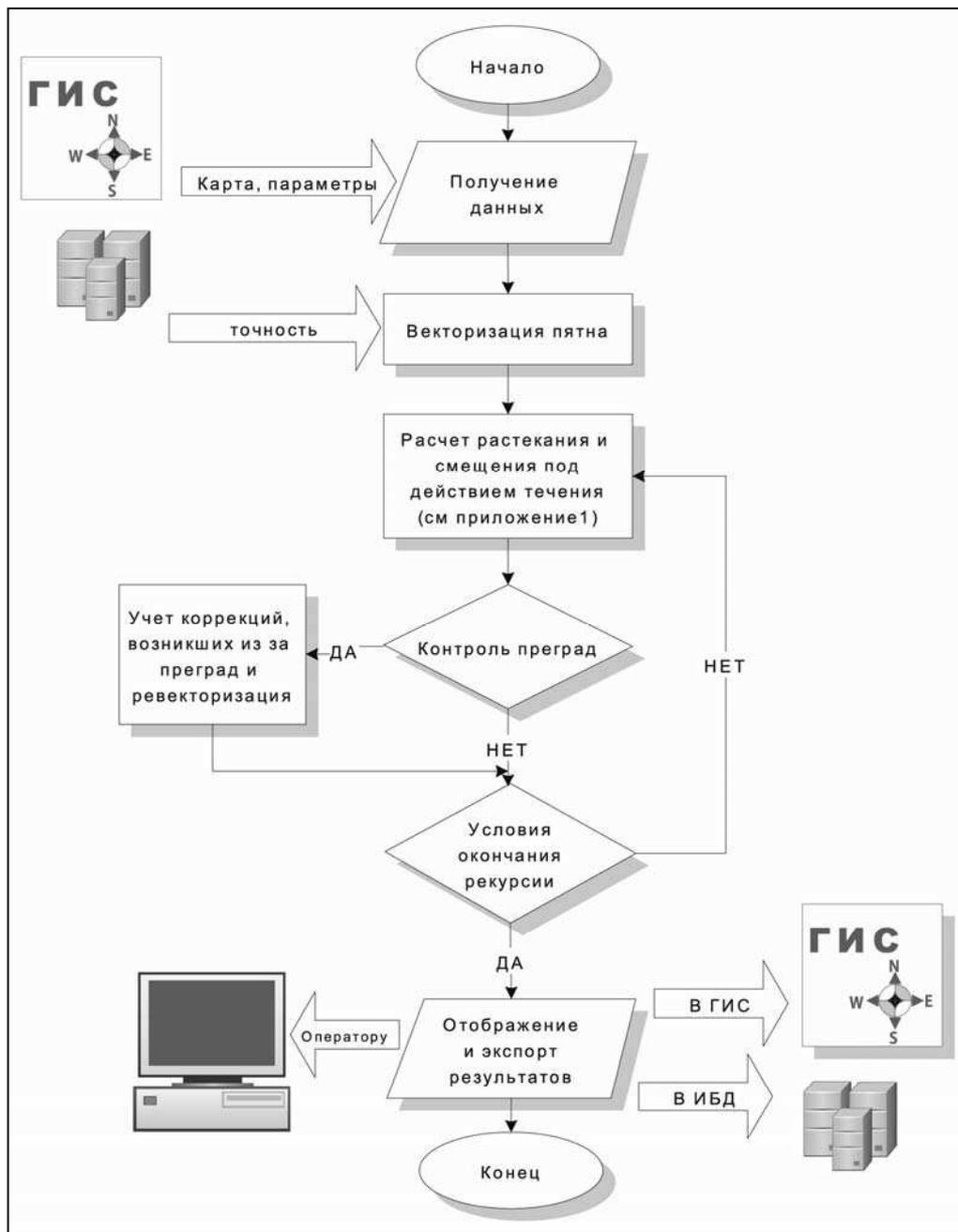


Рис. 1. Блок-схема итерационной части моделирования

Реализация алгоритма предусматривает возможность использования данных от различных источников, а также, при необходимости, менять эти данные на различных шагах моделирования, что дает возможность учесть меняющуюся ситуацию и уточнять модель при появлении новой информации.

Другой важной особенностью реализации является возможность взаимодействия модели с геоинформационной системой:

- получение исходных данных, ранее содержащихся в растровом или векторном слое ГИС, где возможна предварительная обработка, обеспечивающая выделение границ водоема, границ нефтезагрязнения, осуществление геопривязки (в случае наличия геопривязки, при экспорте фрагмента, она не теряется, а должна быть сохранена в специальном файле, достоверность которого не теряется после проведения моделирования, т.к. преобразования не затрагивают топологии местности);

- получение дополнительной информации для модели (например, данных наземных измерений) также возможно из ГИС и, при использовании в составе комплекса мониторинга, может быть автоматизировано;

- загрузка полученных результатов моделирования в исходную ГИС для учета в качестве прогноза ситуации. При загрузке возможно использование ранее сформированного файла геопривязки фрагмента, что обеспечивает точное соответствие координат исходным.

Эти возможности позволят использовать представленный алгоритм в составе комплексов мониторинга и обработки экологической информации, добавляя в них возможность прогнозирования, что в свою очередь обеспечит возможность автоматизации и более полного учета параметров модели.

Пример моделирования разлива нефтяного пятна, в условиях близости берега и наличия препятствий показан на рисунке 2 в виде некоторых итерационных этапов процесса моделирования.

Основные результаты

1. Разработана и реализована прогнозная модель распространения нефтезагрязнения на поверхности водоема.

2. Показана возможность использования данных дистанционного зондирования в качестве основы для осуществления прогнозного моделирования экологической обстановки.

3. Построена и испытана модель взаимодействия реализованного алгоритма прогнозного моделирования с геоинформационной системой, что позволит использовать представленный алгоритм в составе комплексов мониторинга и обработки экологической информации.

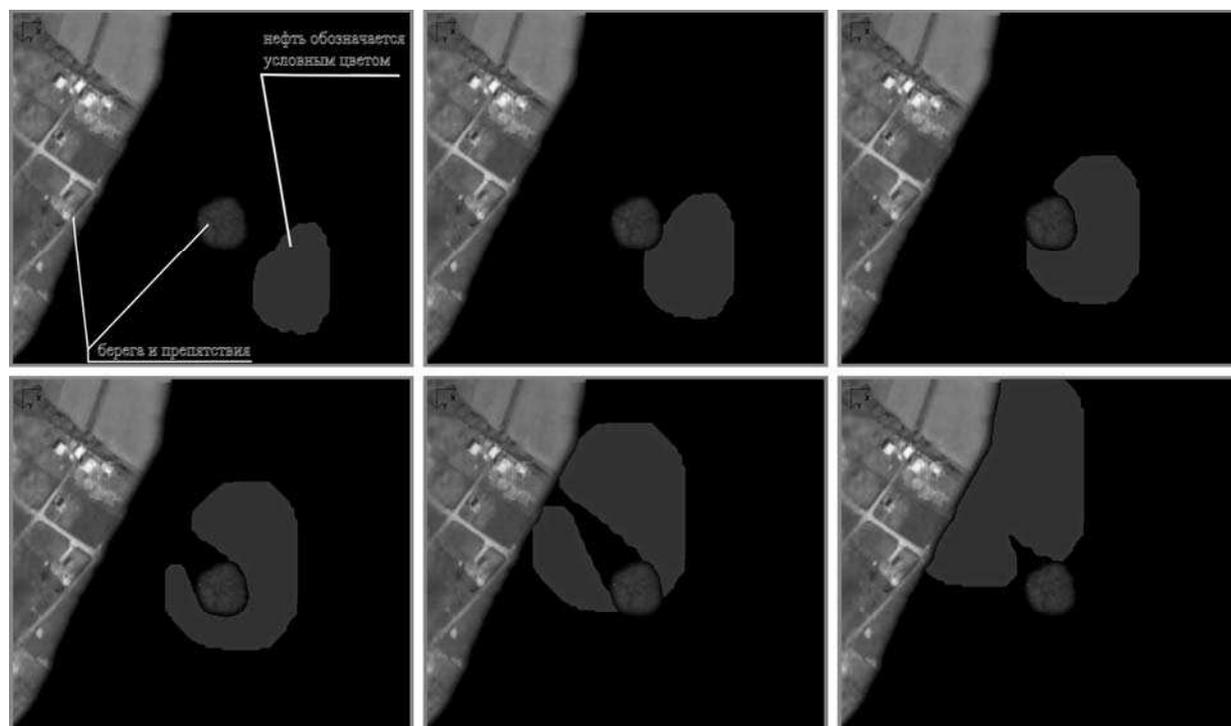


Рис. 2. Пример моделирования разлива нефтяного пятна

Представленный пример алгоритма имеет структуру, которая позволит гибко использовать данные, полученные из различных источников, а также, при необходимости, менять эти данные на различных шагах моделирования, что дает возможность учесть меняющуюся ситуацию и уточнять модель при появлении новых данных. Принятые в модели упрощения и допуски, позволяют, при сохранении достаточной для экологического прогнозирования точности, обеспечить приемлемую скорость обработки информации. Причем величина допусков может регулироваться оператором в зависимости от наблюдаемых условий как в начале расчета, так и на любой итерации.

Литература

1. Seatrack Web 2.0 - an on-line oil drift forecasting system for emergency purposes. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. // SE-601 76 Norrkoping . Sweden, 2005. P. 1-4.
2. *James W. Weaver*. Characteristics of Spilled Oils, Fuels, and Petroleum Products: 3a. Simulation of Oil Spills and Dispersants Under Conditions of Uncertainty.// Ecosystems Research Division National Exposure Research Laboratory ,Athens, Georgia 30605. P. 648-654.
3. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. Под ред. В.Н. Рождествина // М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. С. 227- 228.
4. *Buckmaster*. Viscous-gravic Spreading of on oil slick. // J. Fluid Mech., vol. 59, 1973.
5. *Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И., Орлов В.М. и др.* Радиофизический мониторинг загрязнений природной среды // М.: «Аргус», 1994. 107 с.