

Министерство образования Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи
УДК 551.46.09: 628.5 – 032.32 (262.81)

Асадов Сабир Бахман Оглы

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург
2003

Работа выполнена в Российском Государственном Гидрометеорологическом
Университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Л. Н. Карлин

Официальные оппоненты: доктор географических наук,
Науменко Михаил Арсеньевич

кандидат географических наук,
Клойков Евгений Юревич

Ведущая организация: Государственный океанографический
институт (ГОИН)

Защита диссертации состоится «22» мая 2003 г., в 15³⁰ часов на заседании
специализированного совета (Д.212.197.02) Российского государственного
гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-
Петербург, Малоохтинский проспект, 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского
государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «*В*» 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук



Воробьев В. Н.

2003-A
8352

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

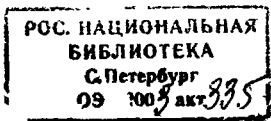
Актуальность темы. Перспектива развития хозяйственного использования ресурсов прибрежной области морей тесно связана с необходимостью детального изучения свойств и закономерностей гидрофизических процессов, среди которых существенный интерес представляют ветровые течения и перенос неконсервативных примесей. Общеизвестно огромное значение Каспийского моря для экономики всех прибрежных государств моря как одного из самых богатых природными, минеральными и биологическими ресурсами водоемов мира. В то же время оно отличается высоким уровнем техногенной загрязненности, особенно усилившейся в последние десятилетия по мере освоения морских месторождений нефти и газа. Расширение нефтедобычи, увеличение объемов перевозок и связанное с этим загрязнение нефтью Каспийского моря, в частности в Азербайджанском секторе, создающее экологическую опасность обуславливает актуальность диссертации.

Наибольшему антропогенному воздействию подвергается прибрежная зона моря, принимающая нефтяное загрязнение в составе речных вод, промышленных и бытовых стоков, нефтедобычи и при аварийных разливах, которые нарушают природное экологическое равновесие. С другой стороны следует учитывать, что именно прибрежные районы являются наиболее продуктивной зоной и содержат значительное количество биологических, энергетических и минеральных ресурсов. Поэтому одной из важнейших задач, стоящих перед современной наукой, является решение проблемы охраны водных ресурсов от загрязнений антропогенного происхождения.

В связи с этим на первой план выходят вопросы эффективного и точного прогноза загрязнения морской среды и оперативной выработки предложений по ликвидации его последствий. Эта актуальная задача может быть решена с помощью математического моделирования.

Цели и задачи работы. Целью работы является исследование закономерностей нефтяного загрязнения Каспийского моря с более детальным рассмотрением Азербайджанского сектора в соответствии с интересами республики. Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач:

- 1) Сформулировать информационную базу гидрометеорологических данных, приспособленную для исследования процессов нефтяного загрязнения в Каспийском море и в его Азербайджанском секторе.
- 2) Исследовать особенности нефтяного загрязнения и его проявлений в Каспийском море, в частности в Азербайджанском секторе.
- 3) Сформулировать математические модели растекания нефтяного пятна при техногенных авариях.



4) Приспособить для Каспийского моря модель дрейфа нефтяных пятен, возникших вследствие аварийных разливов под влиянием ветрового воздействия.

5) Исследовать закономерности дрейфа нефтяных пятен в Азербайджанском секторе Каспийского моря в зависимости от типовых гидрометеорологических условий.

6) Исследовать закономерности дрейфа нефтяных пятен в сезонном масштабе изменчивости в Азербайджанском и Казахском секторах Каспия.

7) Исследовать закономерности распространения по акватории Каспийского моря нефти за счет выноса из основных рек Каспия.

8) Исследовать закономерности распространения по акватории Каспийского моря нефти в случае аварийных разливов.

9) Выработать рекомендации по уменьшению нефтяного загрязнения Каспийского моря. При этом более подробно остановиться на Азербайджанском секторе.

Научная новизна. В ходе проведенного исследования были получены следующие новые результаты.

Выполнено впервые подробное комплексное исследование нефтяного загрязнения для Каспийского моря.

Рассмотрены на примере Каспийского моря различные виды нефтяного загрязнения на всех стадиях трансформации нефти под влиянием внутренних механизмов и внешних действующих факторов.

Применен для Каспийского моря лагранжев подход для исследования дрейфа нефтяных пятен при различных гидрометеорологических условиях как стационарных, так и нестационарных.

Для Каспийского моря применена моделирующая система "Cardinal" для расчета течений и переноса примеси на основе двух- и трехмерной постановок. Одно из преимуществ модели в том, что она позволяет учесть сложную береговую конфигурацию.

Практическая ценность. Полученные в диссертации результаты имеют большое практическое значение и могут быть использованы органами государственной власти Азербайджана, занимающимися ликвидацией нефтяного загрязнения и охраной ресурсов Каспийского моря, а также в организациях, связанных с добычей и использованием морских ресурсов. Практическая ценность работы состоит в том, что с помощью математических методов, сформулированных в диссертации, можно оперативно прогнозировать распространения нефти и нефтепродуктов, а также исследовать влияние на процесс распространения гидрометеорологических факторов в Каспийском море, а также в

возможности оперативной выработки предложений по ликвидации последствий нефтяного загрязнения.

Апробация работы. Отдельные положения и результаты работы были представлены на научных семинарах кафедры промысловой океанологии и охраны природных вод РГГМУ в 2000 - 2003 годах и на итоговых сессиях ученого совета РГГМУ в период 2002 - 2003 годов.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и восьми приложений. Общий объем работы составляет 259 страниц, 146 страницы текста, включая 26 рисунков и 26 таблиц, также 113 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, излагаются цели и задачи диссертационной работы, новизна и внедрение результатов данной работы.

В первой главе работы приводится описание физико-географических особенностей Каспийского моря. Рассматриваются геоморфологическая, климатическая и гидрологическая характеристики акватории, а также исследована гидрометеорологическая характеристика за 1997 г.

Во второй главе описаны физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов месторождений Каспийского моря, в частности Азербайджанской акватории. Основные источники поступления нефти и нефтепродуктов в Каспийское море – это их вынос с речным стоком; сброс неочищенных промышленных и сельскохозяйственных стоков, коммунально-бытовых сточных вод городов и поселков, расположенных на побережье моря; судоходство; эксплуатация нефтяных и газовых скважин; транспортировка нефти морским путем, а также вторичное загрязнение при дноуглубительных работах.

Места поступления загрязнения с речным стоком сосредоточены в Северном Каспии, промышленные стоки приурочены к району Апшеронского полуострова, а повышенное нефтяное загрязнение Южного Каспия связано с нефтедобычей и нефтеразведочным бурением, а также с активной вулканической деятельностью (грязевой вулканизм) в зоне нефтегазоносных структур. Проанализировано среднее содержание нефтяных углеводородов в Каспийском море.

Исследовано экологическое состояние Азербайджанской акватории, а также проанализированы аварийные ситуации, имевшие место на Каспийском море, связанные с загрязнением моря нефтепродуктами. Так, судя по имеющимся сведениям, на азербайджанскую акваторию в интервале ряда

последних лет с 1978 по 1995 г. ежегодно сбрасывается 667.72 млн. м³/г сточных вод, из которых 356.65 млн.м³/г были не очищенными. При этом в их составе находилось много загрязняющих веществ, в том числе нефть 13.9 тыс.т/г. В акватории доминирует загрязнение нефтяными углеводородами, связанное активной нефтедобычей на морских месторождениях островов Нефтяные Камни, Бахар, Булла, Пираллахи, Жилой и т.д., в последние годы охватывающей еще большие глубины моря.

В третьей главе описаны гидродинамические модели для расчета распространения нефти и нефтепродуктов в Каспийском море.

В разделе 3.1 описывается модель растекания нефти и нефтепродуктов, попадающих на поверхность при аварии танкеров в Каспийском море. Сначала наблюдается растекание нефти на поверхности моря под действием силы тяжести, а затем важными в балансе сил становятся силы вязкости и поверхностного натяжения. В растекании нефти по поверхности море обычно выделяют три режима: Инерционный, гравитационно-вязкий и режим поверхностного натяжения.

В итоге получаем зависимость радиуса пленки нефти от времени для инерционного режима растекания:

$$R_1^2 - R_0 \cdot R_1 = k_1 \cdot \Delta t \sqrt{g \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} \cdot V}, \quad (1)$$

где R_1 - радиус пятна нефти в инерционном режиме, R_0 - начальный радиус круглого пятна нефти, V - объем разлитой нефти, t - время с момента пролива нефти, g - ускорение свободного падения, ρ - плотность воды, ρ_n - плотность нефти, k_1 - константа порядка единицы.

Переход от инерционного к гравитационно-вязкому режиму выполняется следующим образом:

$$\delta = \sqrt{v \cdot t}, \quad (2)$$

где δ - толщина вязкого пограничного слоя, V - кинематический коэффициент молекулярной вязкости воды.

Расчет радиуса нефтяной пленки в гравитационно-вязком режиме имеет вид

$$R_2^6 - R_2^5 R_1 = k_2 \left[g \frac{\rho - \rho_n}{\rho} V^2 \Delta t^{3/2} v^{-1/2} \right], \quad (3)$$

где R_2 - радиус пятна нефти гравитационно-вязком режиме, k_2 - константа порядка единицы.

Сила поверхностного натяжения становится существенной, когда она по порядку величины равняется градиенту давления. Такое условие наступает, когда толщина слоя нефти в процессе растекания пятна достигает величины

$$h_{kr} = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho - \rho_H)}}, \quad (4)$$

где σ - суммарное поверхностное натяжение, равное $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$, σ_1 - на границе раздела вода - воздух, σ_2 - на границе раздела вода-нефть, σ_3 - на границе раздела нефть-воздух,

В итоге радиус нефтяной пленки в режиме поверхностного натяжения рассчитан следующим образом:

$$R_3^2 - R_2 R_3 = k_3 [\sigma \cdot \rho^{-1} \cdot \nu^{-1/2} \cdot \Delta t^{3/2}], \quad (5)$$

где k_3 - константа порядка единицы

Раздел 3.2 посвящен расчету дрейфа нефтяного пятна по поверхности Каспийского моря. Для расчета выбран лагранжев подход.

Одним из возможных путей описания и расчета концентрации примеси с произвольным периодом осреднения в морях с большим лагранжевым масштабом времени является метод маркеров.

В его основе лежит анализ закономерностей случайных блужданий частиц и вычисление вероятностей тех или иных событий. С точки зрения диффузионных задач наибольший интерес представляют пропорциональные концентрациям примеси условные вероятности перехода частиц из одной точки пространства в другую в течение отрезка времени Δt . Очевидно, вычисление их можно провести путем статистической обработки конечных координат большого количества подсчитанных траекторий блуждающих частиц, которые образуют облако примеси.

Пятно нефти можно представить в виде набора слабосвязанных частиц со слабо развитой горизонтальной диффузией. Тогда задачу дрейфа пятна можно решить в лагранжевых координатах.

При моделировании в лагранжевых координатах приращение траектории пятна записывается в виде

$$\Delta x_{imk} = U_{im} \cdot \Delta t + \eta_{imk}, \quad (6)$$

где η_{imk} - случайная величина, i - номер координаты, m - номер временного шага, k - номер частицы,

Распределение η_{imk} можно описать некоторым законом, вид которого зависит от времени Δt . Если поле скоростей течений можно считать постоянным в течение Δt , то закон распределения η_{imk} является нормальным, и при его реализации случайная величина η_{imk} представляет из себя произведение средней дисперсии на случайное число, распределенное по нормальному закону:

$$\eta_{imk} = \gamma_{imk} \cdot \sqrt{\sigma_i^2}. \quad (7)$$

По Монину и Яглому σ_i^2 имеет вид

$$\sigma_i^2 = 2 \cdot K_i \cdot t, \quad (8)$$

При слабой взаимосвязи частиц коэффициент горизонтального турбулентного обмена можно рассчитать на основе экспериментальных и лабораторных исследований:

$$K_i = \frac{U^2 \cdot H^2}{30 K_z s}, \quad (9)$$

где H_s – толщина верхнего квазиоднородного слоя, K_z – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии, выражаемый через экмановское соотношение для толщины слоя трения.

При расчете дрейфа нефти в виде пятна на поверхности моря σ_i^2 стремится к нулю ($\sigma_i^2 \rightarrow 0$).

В разделе 3.3.1 описывается последовательный вывод уравнений движения и переноса примеси в трехмерной и двухмерной постановках, используемых в модели Cardinal. Уравнения в трехмерной постановке имеют вид

$$u_t + uu_x + vv_y + ww_z = -\frac{\rho_s}{\rho_o} g \zeta_x - \frac{g}{\rho_o} \int \rho_x dz - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial x} + fv + K(u_{xx} + u_{yy}) + (ku_z)_z, \quad (10)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + wv_z = -\frac{\rho_s}{\rho_o} g \zeta_y - \frac{g}{\rho_o} \int \rho_y dz - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial y} - fu + K(v_{xx} + v_{yy}) + (kv_z)_z, \quad (11)$$

$$u_x + v_y + w_z = \varpi_s, \quad (12)$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = \omega_s, \quad (13)$$

$$c_t + (cu)_x + (cv)_y + [c(w - w_0)]_z = \varpi_s c - \lambda c + K(c_{xx} + c_{yy}) + (kc_z)_z, \quad (14)$$

где $\vec{v} = (u, v, w)$ - скорость воды, g - ускорение силы тяжести, $\zeta(x, y, t)$ - уровень свободной поверхности, $\rho(\vec{x}, t)$ - плотность воды, P_a - атмосферное давление, $f = 2\omega \sin \varphi$ - параметр Кориолиса, φ - географическая широта, K и k - коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена, ϖ_s - объем воды, поступающий в единичный объем за единицу времени из внутренних источников, U и V - полные потоки, ω_s - объем воды, поступающий от внутренних источников на единицу поверхности в единицу времени, $c(x, t)$ - концентрация растворенных или взвешенных примесей, w_0 - скорость всплывания или осаждения взвешенных примесей, c_s - концентрация

примеси поступающей из источника, λ - коэффициент неконсервативности, k_c, K_c - коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии примеси. Координата z направлена вертикально вверх.

Уравнения решаются при задании некоторых начальных и следующих граничных условий для u, v, ζ , с. Придонные скорости определяются с помощью квадратичного закона трения

$$\begin{aligned}\tau_{b(x)} &= \rho_o k u_z \Big|_{z=-h} = -\rho_o f_b u \Big|_{z=-h} \\ \tau_{b(y)} &= \rho_o k v_z \Big|_{z=-h} = -\rho_o f_b v \Big|_{z=-h},\end{aligned}\quad (15)$$

где f_b - коэффициент придонного трения, определяемый для динамически шероховатых поверхностей с помощью логарифмического закона стенки:

$$f_b = \frac{\kappa^2}{\ln^2 \left(\frac{z_b}{z_0} \right)}, \quad (16)$$

где $\kappa = 0.41$ - постоянная Кармана, z_b - расстояние от дна (при вычислениях оно равно расстоянию от дна до первого узла сетки), z_0 - параметр шероховатости дна.

Для ветровых условий, поверхностная скорость определяется из квадратичного закона:

$$\begin{aligned}\tau_{s(x)} &= \rho_a k u_z \Big|_{z=\zeta} = \rho_a C_D w_{(x)} |\bar{W}| \\ \tau_{s(y)} &= \rho_a k v_z \Big|_{z=\zeta} = \rho_a C_D w_{(y)} |\bar{W}|,\end{aligned}\quad (17)$$

где \bar{W} - вектор скорости ветра с компонентами $w_{(x)}, w_{(y)}$, ρ_a - плотность воздуха, C_D - коэффициент ветрового трения.

На открытых боковых границах одним из граничных условий, которые будут задаваться, является равенство нулю касательной к границе составляющей скорости: $u_\tau = 0$, второе граничное условие может быть разных типов. Для первого типа задается нормальная компонента скорости как функция времени: $u_n = f(t)$. Для второго типа задается уровень воды: $\zeta = \zeta(t)$. Для третьего типа задается линейная зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем:

$$u_n = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \zeta \quad (18)$$

На твердых боковых границах нормальная компонента скорости u_n равна нулю. Для тангенциальной компоненты u_τ введен квадратичный закон трения, аналогичный придонному. Таким образом, граничное условие на твердых боковых границах имеет вид

$$u_n = 0,$$

$$K \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = -f_b u_\tau |\nabla|. \quad (19)$$

На открытых границах, через которые вода поступает в расчетную область, задается временной ход концентрации примеси $c=c(t)$. На открытых границах, через которые вода вытекает из расчетной области, граничное условие для c не задается, при условии, что адвекция доминирует над диффузией.

Коэффициент вертикальную турбулентного обмена k определен с помощью соотношения Прандтля

$$k = \mu_{mol} + l^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}, \quad (20)$$

где $l(x, y, z, t)$ - вертикальный масштаб турбулентности. Естественным обобщением формулы Прандтля для двух смыкающихся пограничных слоев (придонного и поверхностного) является формула *Монтгомери*:

$$l = \kappa(z + h + z_0)(-z + \zeta + z_\zeta) / H, \quad (21)$$

где z_ζ - параметр шероховатости свободной поверхности, H - полная глубина потока. Это выражение для масштаба турбулентности дает правильную асимптотику в пограничных слоях. Уточнением формулы Рейда является выражение (Вольдинггер и др.).

$$l = \frac{\kappa}{H} Z_h Z_\zeta Z_0$$

$$Z_h = (z + h + z_0) \quad Z_\zeta = (-z + \zeta + z_\zeta), \quad (22)$$

$$Z_0 = (1 - 1.2H^{-2} Z_h Z_\zeta)$$

В двумерной постановке осредненные по глубине уравнения движения и распространения примеси имеют вид

$$U_t + \left(\frac{U^2}{H}\right)_x + \left(\frac{UV}{H}\right)_y = -gH\zeta_x - \frac{gH^2}{2\rho_0} \rho_x - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + fV +$$

$$+ K\Delta U + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} w(x) |\mathbf{W}| - f_b \frac{U |\nabla|}{H^2}$$

$$V_t + \left(\frac{UV}{H}\right)_x + \left(\frac{V^2}{H}\right)_y = -gH\zeta_y - \frac{gH^2}{2\rho_0} \rho_y - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - fU +$$

$$+ K\Delta V + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} w(y) |\mathbf{W}| - f_b \frac{V |\nabla|}{H^2}$$

$$c_t + U_x + V_y = \omega_s, \quad (25)$$

$$(\bar{c}H)_t + (U\bar{c})_x + (V\bar{c})_y = K_c H \Delta \bar{c} - \lambda \bar{c} H + \bar{c}_s \omega_s - f_s, \quad (26)$$

где f_s - потери c , связанное с седиментацией или всплыванием.

В разделе 3.3.2 описываются преимущества метода решения уравнений гидродинамики и переноса примеси в криволинейных гранично-зависимых координатах, приведены основные соотношения преобразования координат. Граничные условия обычно оказывают определяющее влияние на характер решения, а использование в качестве граничных узлов сетки те, которые не совпадают с границей области, вносит ошибку именно в эти наиболее важные области. Переход к гранично-зависимым криволинейным координатам дает возможность значительно увеличить точность решения.

Для трехмерных задач упрощенный вид преобразования, соответствующий неподвижным береговым границам, допускающий, что спрямляемая боковая поверхность оказывается цилиндрической, и горизонтальные координаты не зависят от вертикальной координаты. В качестве переменных в модели используются контравариантные компоненты потока.

Уравнения в криволинейных координатах решаются конечно-разностными методами. Переход к гранично-зависимым криволинейным координатам дает возможность решать уравнения уже не в данной физической области, а в трансформированной - канонической, например такой, как на рисунке 1.

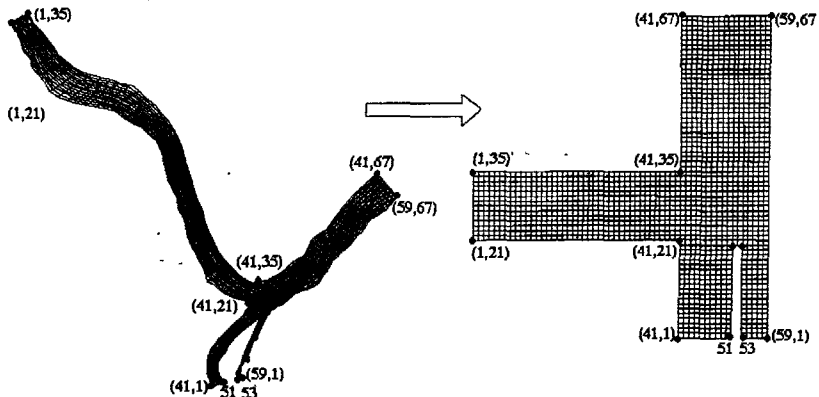


Рисунок 1 – Пример перехода к гранично-зависимым криволинейным координатам

Важное место при решении уравнений гидродинамики занимает полунявные схемы, в которых градиенты уровня аппроксимируются неявно, в адвективные члены аппроксимируются явно. Решение в данном случае

осуществляется с помощью метода прогонки для одной из переменных на каждом полушаге и нахождения двух других компонент по явным зависимостям. Преобразованные уравнения мелкой воды решаются полуневяным конечно-разностным методом, в котором адвективная мода, а также сила Кориолиса и горизонтальный турбулентный обмен аппроксимированы явно, а гравитационная мода и придонное трение аппроксимированы неявно.

При решении задач в трехмерной постановке вертикальное распределение компонент потока определяется на каждом временном полушаге после решения уравнений мелкой воды, в которых придонное трение берется из решения трехмерной задачи на предыдущем полушаге. После этого переопределяются интегральные потоки, затем сохранения массы, уточняется уровень.

Адвективно-диффузионные уравнения решаются с помощью неявной гибридной схемы, состоящей из операторов направленных разностей третьего и первого порядков точности по пространству для адвективных членов и центрально разностных операторов второго порядка точности для диффузионных членов. Для решения используются методы пяти- и трех-точечных прогонок.

Численная схема тестировалась на точных и приближенных аналитических решениях различных модельных задач. Результаты показали, что гибридная схема обладает лучшими свойствами.

В четвертой главе представлены результаты расчета распространения нефти и нефтепродуктов в гидродинамических моделях, описанных в третьей главе. В первом разделе показаны результаты расчета растекания нефти на поверхности Каспийского моря. Рассчитаны случаи растекания различных объемов при аварийных разливах нефти в море, при объемах нефти в 100 - 500, 700, 800, 1000, 2000, 3000, 5000, 8000 и 10000 м³ соответственно. Приведем примеры полученные в модели: если объем вылитой нефти на поверхность моря составляет 1000 м³ и 10000 м³, тогда в инерционной фазе растекания нефти достигают толщины 0.02727 м и 0.04107 м, а радиусы их в течение 880 с. и 1760 с. достигают расстояний 192 м и 494 м соответственно. В гравитационно-вязкой фазе радиус нефти достигает 490 м и 1545 м соответственно, а длительность растекания нефти составили 7.4 ч и 36 ч, а толщина нефти 0.004188 м и 0.004192 м соответственно. Длительность в режиме поверхностного натяжения растекания для таких объемов нефти близка к 144.5 и 672.4 ч, то есть 6 и 28 дней, а радиусы составили 3 км и 10 км. Естественно, при увеличении объемов вылитой нефти в море длительность растекания увеличивается.

Во втором разделе показаны результаты расчета дрейфа нефтяного пятна с лагранжевым подходом по поверхности Каспийского моря. Поля течений рассчитаны на двухмерной стационарной и нестационарной моделях. При

расчетах полей течений использовались четырех срочных натуральных наблюдения за направлением и скоростью ветра по 15 станциям, расход рек Волга, Урал и Кура по сезонам за 1997 г, а также уровень воды. Расчеты выполнялись в марте, июне, сентябре и декабре. Расчеты поля течений и переноса нефти в двухмерной стационарной модели выполнены при разных ветрах, более повторяющихся в течение года, при северо-восточном и юго-восточном ветрах со скоростью 5 м/с, и при северном и северо-западном ветрах со скоростью 6 м/с. Расчеты дрейфа нефтяного пятна проводились для станций Бакинской бухты, Нефтяного Камня, Бахар и Форт-Шевченко с разными начальными радиусами, шаг по времени равен 6 часам, а количество маркеров равно 10000.

Результаты расчета дрейфа нефтяного пятна, полученные в нестационарной и стационарной моделях, показывают, что в обеих моделях направление пятна, в основном: – от источника Бакинской бухты Ю и ЮЗ, от источника Нефтяные Камни В и СВ, от источника Бахар СВ, а Форт-Шевченко ЮВ. Дрейф нефтяного пятна за период расчета от источника Бакинской бухты схож с дрейфом пятна рассчитанным при СЗ ветре. Результаты других сезонов близки по направлению, так как, в стационарной модели пятно растекалось вдоль берега по прямой линии, а при реальных условиях оно отличается по сравнению с расчетом на стационарной модели. От источника Нефтяного Камня направления пятна весной и летом схожи с направлениями пятен, рассчитанных при северном и северо-западном ветрах. Результаты расчетов направления пятна от источника Бахар в обеих моделях весной, летом и при северном и северо-западном ветрах соответствуют, а от источника Форт-Шевченко совпадают по направлению летом и при северном и северо-западном ветре, также декабре и юго-восточном ветре.

На основе вышеизложенного мы убеждаемся, что направление растекания пятна в стационарной модели (при северном и северо-западном ветрах) и в нестационарной модели по всем сезонам года совпадает с направлениями дрейфовых течений.

В третьем разделе представляются результаты расчета переноса нефти и нефтепродуктов в Каспийском море на основе полей течений, рассчитанных в двух- и трехмерной нестационарной и двухмерной стационарной моделях, которые подробно описаны в разделе 3.3. Расчеты полей течений Каспийского моря выполнялись в двухмерной и трехмерной постановке на сетке 143x301 узла с шагом по пространству 500 м. При расчете поля течений использовались четырех срочных натуральных наблюдения за направлением и скоростью ветра по 15 станциям Каспийского моря, а также уровень воды на ст. Баку. Задавались также расходы рек Волга, Урал и Кура. Было задано 5 источников аварийного разлива нефти, и также нефть поступала из рек Волга и Кура. Концентрация нефти во всех источниках задавалась равной единице. Источники условных аварийных разливов нефти в обеих моделях следующие:

Нефтяные Камни с мощностью 500 кг/с, Сумгаит и Бахар с мощностью 400 кг/с, Форт-Шевченко и Челекен с мощностью 300 кг/с.

Кратко проанализируем результаты расчетов полей течений и переноса нефти, полученных за 1997г. на основе вышеописанных моделей. Так, результаты в двухмерной нестационарной модели следующие.

Формируется антициклонический круговорот в Южном Каспии за период расчета на нестационарной модели, кроме, исключая декабрь. Существуют также антициклоническая на юго-западной и циклоническая циркуляции на юго-восточной части. В декабре образуется циклоническая циркуляция в западной, антициклоническая – в северной и восточной частях Южного Каспия. В Среднем Каспии формируются циклоническая циркуляция в северо-западной, восточной и юго-восточной части и антициклоническая в юго-западной, северо-восточной и также глубоководной части ближе к западному берегу по всем сезонам года. В Северном Каспии циклоническая циркуляция формируется на юго-западной, юго-восточной части, а антициклоническая – в северо-восточной. Скорость течений в открытой части не больше 5 см/с, максимальная скорость в Северном Каспии 10 - 20 см/с, по берегам она меняется от 10 до 50 см/с.

Результаты переноса нефти, полученные на основе этих полей течений следующие.

Нефть из реки Волги в марте распространилась на юг по берегу, в июне на открытую часть, а в сентябре и декабре она далеко не распространилась. В марте из реки Куры нефть распространилась на север и на юг вдоль берега, в июне на открытую часть, а в других месяцах – на юг. От источника Нефтяные Камни нефть в марте и сентябре далеко не распространилась, в июне и декабре она двигалась на северо-восток и север соответственно. Концентрация нефти в центре источника в марте, июне, сентябре и декабре уменьшалась до 0.03, 0.05, 0.02 и 0.06 кг/м³ соответственно. От источника Бахар нефть распространилась в марте на север, в июне на северо-восток, в сентябре на юго-запад и в декабре на юг и север. Концентрация нефти в центре источников в рассчитанных месяцах уменьшалась до 0.09, 0.18, 0.05, 0.17 кг/м³. От Сумгаита нефть распространялась во всех месяцах по северному берегу Апшерона на восток и северо-восток, в сентябре также на северо-запад. Ее концентрация уменьшалась до 0.13, 0.34, 0.16, 0.33 кг/м³. Нефть от источника б. Челекен распространилась на значительное расстояние на юг во всех месяцах, кроме декабря (на север). Концентрация нефти в центре источников уменьшалась до 0.09, 0.03, 0.08 и 0.2 кг/м³. От станции Форт-Шевченко нефть во всех месяцах распространялась на большое расстояние на юг, кроме декабря (на север) и марта (на север и юг). Концентрация нефти в центре источников уменьшалась до 0.22, 0.23, 0.38 и 0.22 кг/м³ соответственно.

Поля течений и перенос нефти в двухмерной стационарной модели рассчитаны при северо-восточном и юго-восточном ветрах со скоростью 5 м/с, и при северном и северо-западном ветрах со скоростью 6 м/с, при штиле (северо-западный ветер (0 м/с)), наиболее повторяющихся в течение года. Результаты в двухмерной нестационарной модели следующие.

При северо-восточном ветре формируются циклоническая в Среднем и слабая антициклоническая циркуляции на поверхности в Южном Каспии. Существует также циклоническая циркуляция на юго-западной части Южного, средней части Среднего и восточной части Северного Каспия. При северном ветре поле течения повторяет картину поля течений, полученную при северо-восточном ветре. Кроме этого формируются антициклоническая и циклоническая циркуляции в западной половине Северного и северо-западной части Среднего Каспия. В западной и восточной части Среднего Каспия формируется антициклоническая циркуляция при северо-западном ветре. Антициклоническая и циклоническая циркуляции на поверхности сохраняются в глубоководных частях Южного и Среднего Каспия. Между Апшероном и рекой Курой формируются антициклоническая и циклоническая циркуляции, такая картина также образуется при юго-восточном ветре. В Среднем Каспии формируется антициклоническая, а в Южном Каспии циклоническая циркуляции. На глубоководных частях скорость течений меньше 2 см/с. В Северном Каспии преобладающие скорости течений 5 - 10 см/с, в западной части 7 - 20 см/с, в восточной 5 - 15 см/с.

Нефть из реки Волги при северо-восточном ветре распространилась на юго-запад, из Куры на север. Нефтяное поле от Нефтяных Камней распространилось на запад, от Сумгаита на восток, от Бахар на юго-запад, от Форт-Шевченко и б.Челекен на юг. Концентрация нефти в центре источников уменьшалась до 0.15, 0.26, 0.14, 0.4 и 0.03 кг/м³. Перенос нефти из рек при северном ветре схож с переносом, полученном в результате расчета при северо-восточном ветре. Нефтяное поле от источников, Нефтяные Камни далеко не распространилось, от Сумгаита на восток, в остальных источниках перенос повторяется. Концентрация нефти в центре источников уменьшалась до 0.04, 0.11, 0.09, 0.12 и 0.01 кг/м³. При северо-западном ветре нефть из рек Волги и Куры распространялась на юго-восток. От Нефтяного Камня и Бахар нефтяное поле распространилось против часовой стрелки на северо-восток, от Сумгаита до юго-восточной части Апшерона, от Форт-Шевченко и б.Челекен на юг. Концентрация нефти в центре источников уменьшалась до 0.03, 0.12, 0.13, 0.1 и 0.02 кг/м³ соответственно. Нефть из реки Куры, от Нефтяного Камня, Бахар, б.Челекен и Форт-Шевченко при юго-восточном ветре распространилась на север, от Сумгаита на северо-запад вдоль берега, а из реки Волги далеко не распространилась. Концентрация нефти в центре источников уменьшалась до 0.07, 0.17, 0.02, 0.12 и 0.24 кг/м³ соответственно.

При штиле нефть из рек распространяется в открытое море, в остальных источниках она далеко не распространилась, собиралась вокруг источников. В центре Форт-Шевченко концентрация нефти 1.2 кг/м^3 , Сумгаит $\sim 0.96 \text{ кг/м}^3$, Нефтяные Камни $- 0.24 \text{ кг/м}^3$, Бахар $- 0.62 \text{ кг/м}^3$, б. Челекен $- 0.37 \text{ кг/м}^3$.

Кратко опишем результаты поля течений и переноса нефти, полученных на основе трехмерной модели.

Условия для этой модели также сохраняются. Поля течений в трехмерной модели сложные. В западной половине на поверхности Южного Каспия формируется антициклонический круговорот во второй половине марта и июня. Течения от устья Кура направлены вдоль берега на север и юг. Существуют также небольшие вихри на юго-западной части. Направления течений на северной части Южного и южной части Среднего Каспия однородные; в сентябре – юго-западное, в декабре – северо-восточное и юго-восточное. Между Апшероном и Курой образуются антициклоническая и циклоническая циркуляции. На горизонте 10 м антициклоническая циркуляция охватывает южную акваторию. Вообще круговороты сохраняются в придонном слое. Формируются антициклонический круговорот в средней части западного побережья и циклонический на южной части Среднего Каспия в марте. В июне сохраняется однородность в глубоководной части. Антициклоническая и циклоническая циркуляции формируются на северо-западной, южной и восточной части Среднего Каспия. В придонном слое циркуляции сохраняются на юге и юго-восточной части. В Северном Каспии в устье Волги поток воды разделяется на две части – одна течет на юго-запад, а другая – на северо-восток вдоль берега. На западной и южной части формируются небольшие антициклоническая и циклоническая циркуляции. Максимальная скорость течений на поверхности Северного Каспия 10 - 25 см/с, а придонном слое 1-5 см/с. Поле течения в придонном слое сохраняется. Средняя скорость вдольбереговых течений на западе 10 - 40 см/с (около Дербента 60 - 90 см/с, зимой 140 см/с), на востоке 7 - 25 см/с (в некоторых местах 40 - 60 см/с). В открытом море скорость течений 3 - 8 см/с.

Рассчитаны вертикальные профили скоростей и коэффициент вязкости в перечисленных источниках. В марте направление течений в Нефтяных Камнях сохраняется (ЮЗ), скорость с глубиной уменьшается (15-9 см/с), в источнике Бахар направление ВЮВ, скорость на поверхности 1 см/с, увеличивается до глубины 16 м (4-5 см/с) а затем уменьшается, в Сумгаите на поверхности направление течений ЮЗ, а на дне СЗ, скорость не больше 1 см/с, в б. Челекен направление на поверхности ЮЗ (6 см/с), а на дне ЮЮЗ (3 см/с), направление на поверхности Форт-Шевченко Ю (1.4 см/с), с глубиной направление течений по часовой стрелке меняется, оно на дне В (0.6 см/с). В июне направление течений в Нефтяных Камнях ЮЗ, скорость с глубиной уменьшается (7 - 2 см/с), в Бахаре – направление ВСВ (6 - 4 см/с),

направление на поверхности Сумгаита ЮЗ, а на дне В, скорость не больше 1 см/с, скорость течений с глубиной уменьшается в б.Челекен и Форт-Шевченко 32 - 8 см/с и 12 - 4 см/с, а направление ЮВ. В сентябре направление течений в Нефтяные Камни (14 - 9 см/с) и Бахар (20 - 4 см/с) – ЮЗ, в б.Челекен (16 - 5 см/с) и Форт-Шевченко – ЮВ, а скорость на поверхности 6 см/с, до глубины 3 м увеличится до 9 см/с, затем уменьшается. В декабре направление течений на поверхности Нефтяного Камня – Ю, а на дне ЮВ, скорость меняется по глубине (20 - 8 см/с), направление течений в станции Бахар меняется с поверхности ко дну – ЮЗ - 3, а скорость 12 - 4 см/с, в Сумгаите направление ЮВ, а скорость 8 - 4 см/с на поверхности Форт-Шевченко направление течений СЗ, а на глубине ЮВ, скорость 2.6 - 0.4 см/с, в б. Челекен направление по глубине меняется ССЗ-СЗ, а скорость 9 - 4 см/с. Коэффициент вязкости в отобранных источниках меняется от 2 до 96 см²/с в течение в рассчитанных месяцев. Распространение нефти существенно зависит от поля течений. В целом следует отметить, что распространение нефти в процессе переноса на поверхности моря в значительной мере определяется ветром, а также конфигурацией берегов и рельефом дна.

Источники нефти в трехмерной модели заданы в придонном слое. Нефть в придонном слое в отобранных источниках быстро распространилась. В очаге источников концентрация нефти равна в Нефтяных Камнях (глубина 58 м) 2.5 E-3 кг/м³, в Бахаре (17.4 м) 0.76 E-2 кг/м³, в Сумгаите (8.4 м) 0.01 кг/м³, в б.Челекене (19.4 м) 0.38 E-2 кг/м³, в Форт-Шевченко (6.5 м) 0.02 кг/м³, а на крайней периферии 1E-3, 1.78 E-3 1E-3, 0.77 E-3, 0.51E-2 кг/м³ соответственно.

При наличии оперативных краткосрочных метеорологических прогнозов ветра и приземного давления над акваторией Каспийского моря будет возможно давать прогнозы распространения пятна при любых условиях. Это позволит организовать спасательные работы и принять предупредительные меры по ликвидации и уменьшению нефти и нефтепродуктов в водоеме более эффективные.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В заключении сформулированы основные результаты исследований, представленные в диссертации.

1. Произведена обобщенная физико-географическая характеристика Каспийского моря с учетом факторов, влияющих на нефтяное загрязнение акватории. При этом сделан подробный анализ гидрометеорологических характеристик 1997 года – как модельного года для исследования. Более детальный анализ выполнен для Азербайджанского сектора Каспия, как имеющего наибольшее значение для экономики республики Азербайджан.

2. Проанализированы физико-химические свойства нефти, характерные для каспийских месторождений. Показано, что нефть обуславливающая загрязнение Каспия характеризуется следующими отличительными свойствами: в основном, нефти по составу малосернистые и масляные. Наряду с этим преобладающим типом в ряде месторождений являются нефти нафтено-метановые, метано-нафтеновые и метановые. В отличие от месторождений Апшеронского п-ова, анализ имеющихся данных по морским месторождениям показывает отсутствие четкой закономерности в изменениях содержания серы и азота.

3. Выполнен анализ влияния нефтяного загрязнения на экологическое состояние Каспийского моря. Установлены основные источники поступления нефти и нефтепродуктов в Каспийское море: вынос с речным стоком (Волга и Кура); промышленные, сельскохозяйственные и коммунально-бытовые стоки городов; аварийные разливы. Осуществлена оценка вклада различных государств в нефтяное загрязнение, а также различных городов Азербайджана. Показано, что наибольший вклад в загрязнение моря вносят сбросы из Российской и Азербайджанской акватории.

4. Выполнен анализ распространения нефтяного загрязнения на различных этапах эволюции. Проанализированы математические модели, воспроизводящие распространение нефти и нефтепродуктов на различных стадиях.

5. Усовершенствован метод расчета растекания нефти на начальных стадиях его распространения: в режимах инерционном, гравитационно-вязком и режиме поверхностного натяжения. Путем математического моделирования установлены закономерности растекания пятна для модельных ситуаций аварийных разливов, которые могут иметь место в Каспийском море. Показано, что для характерных источников загрязнения в Каспийском море характерное время (для объема нефти 100 м^3) в инерционной фазе равно 480 с, в гравитационно-вязкой фазе – 1.5 ч, в режиме поверхностного натяжения – 31 ч, а пространственный масштаб пятна 76, 155 и 1000 м соответственно. Для больших объемов нефти (1000 м^3) характерное время в инерционной фазе равно 880 с, в гравитационно-вязкой фазе – 7 ч, в режиме поверхностного натяжения – 145 ч, а пространственный масштаб пятна – 190, 490 и 3000 м соответственно.

6. Приспособлена для условий Каспийского моря модель дрейфа нефтяного пятна с использованием лагранжевого подхода. По модели осуществлены численные эксперименты, позволившие установить климатические закономерности дрейфа нефтяных пятен по поверхности Каспийского моря, а также в условиях конкретных (для модельного года) гидрометеорологических условий.

7. С помощью программной системы Cardinal разработаны двух и трехмерные модели Каспийского моря. С помощью этих моделей выполнены

нефтепродуктов в Каспийском море от постоянно действующих источников – Нефтяные Камни, Бахар, Сумгаит, Челекен и Форт-Шевченко, а также из устьев рек Волга и Кура. Установлены зоны повышенных концентраций нефтяного загрязнения, формирующиеся под действием гидрометеорологических факторов при постоянно действующих источниках.

8. Результаты, полученные в трехмерной модели, показали, что почти для всех рассчитанных месяцев растворенные нефти из рек Волга и Кура далеко не распространились – находились вблизи устья рек. Только в марте нефть из реки Волга распространилась до Кизлярского залива. В двухмерной модели нефть из реки Волги больше распространяется в открытую часть моря, а из реки Куры она распространилась на юг и на север. В целом, результаты, полученные в двухмерной модели, отличаются значительно, и в дальнейшем следует пользоваться двухмерной моделью.

9. Сравнение результатов, полученных с помощью метода маркеров и моделирующей системы Cardinal, показало, что направление дрейфа нефти от источников Нефтяные Камни и Форт-Шевченко в обеих моделях близко друг к другу, а от источника Бахар оно несколько отличается. Работа с двумя методами показала, что моделирующая система Cardinal имеет некоторые преимущества. В частности, она позволяет определить не только направление дрейфа растворенной нефти, но и концентрацию нефти.

10. На основе математических моделей выработаны рекомендации по уменьшению нефтяного загрязнения. Показана возможность оперативного прогнозирования зон повышенного нефтяного загрязнения при аварийных разливах и иных ситуациях, по прогнозу гидрометеорологической ситуации на акватории Каспия.

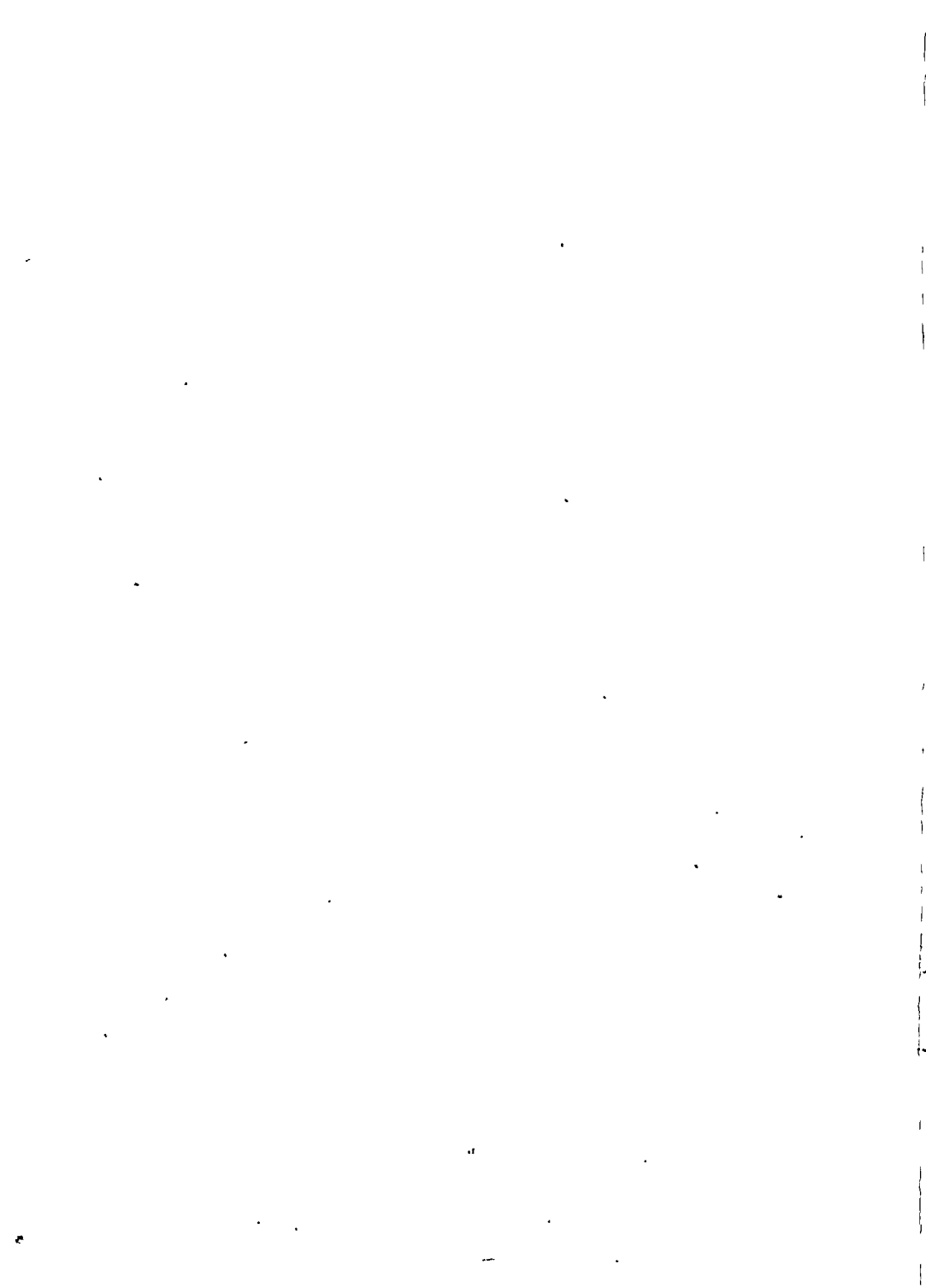
Список опубликованных работ по теме диссертации:

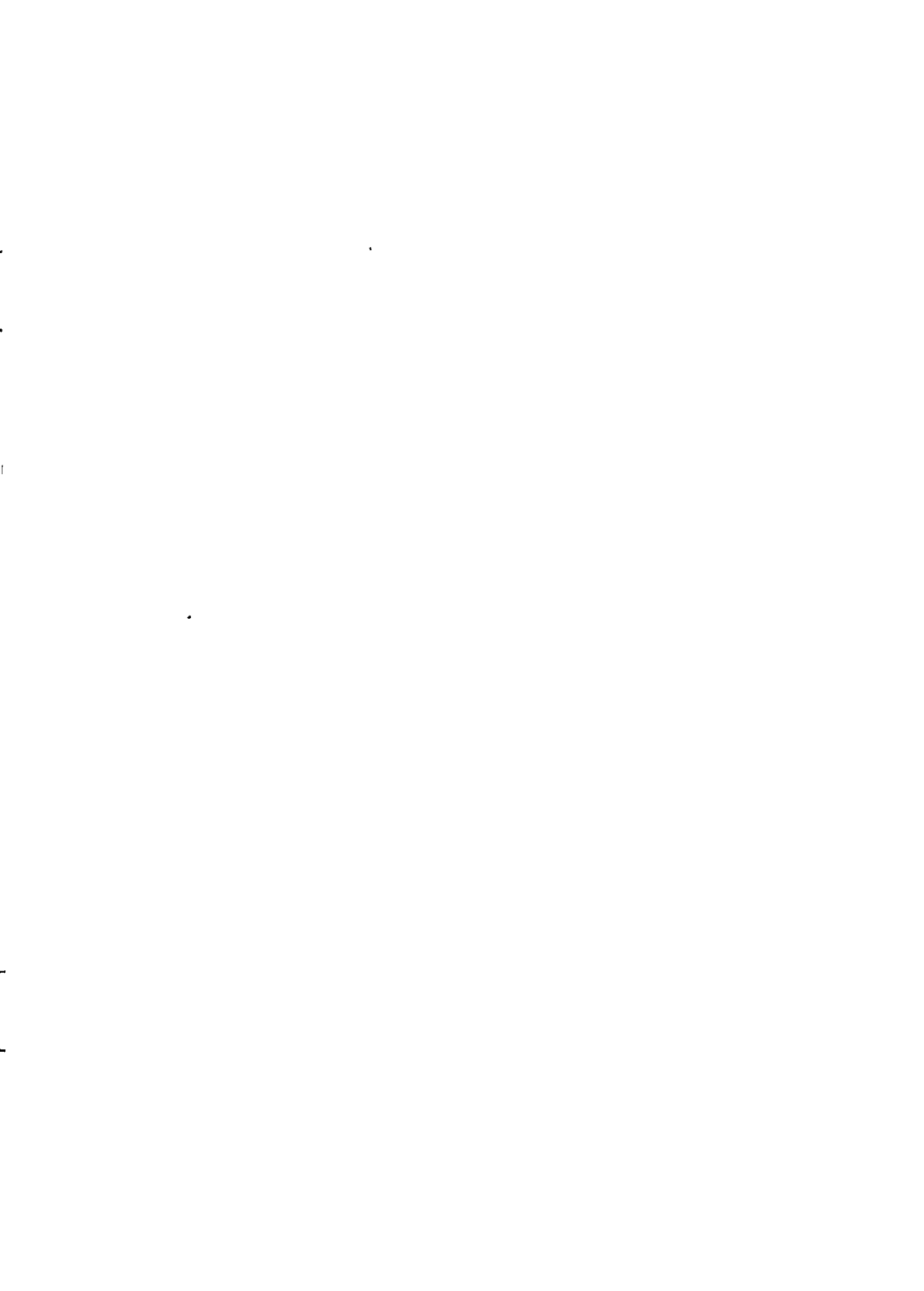
1. Карлин Л.Н., Асадов С.Б. Моделирование загрязнения при аварийных разливах нефти в Каспийском море//Баку-Тбилиси-Джейхан: Мат. Конф., Баку, 6 - 7 июня 2002 г.– Баку, 2002 – С 110-112.

2. Асадов С.Б. Расчет распространения нефтяного загрязнения в Каспийском море//Материалы итоговой сессии Ученого совета РГГМУ 30 – 31 января 2002 г. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2002. – С. 115 – 117.

3. Клеванный К.А., Асадов С.Б. Расчет циркуляции вод в Каспийском море//Материалы итоговой сессии Ученого совета РГГМУ 30 – 31 января 2002 г. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2002. – С. 145 – 146.

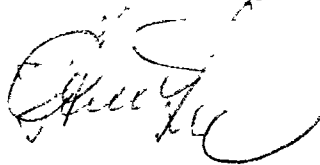
4. Чанцев В.Ю., Асадов С.Б. Расчеты дрейфа нефтяного пятна на поверхности Каспийского моря// Материалы итоговой сессии Ученого совета 27 – 28 января 2003 г. Часть II Секции океанологии, экологии и физики природной среды. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2003. – С. 62 – 63.







Асадов Сабир Бахман Оглы



Отпечатано с готового оригинал-макета

Лицензия ЛР № 0203090 от 30.12.96

Подписано в печать 16.04.03

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Уч.-изд. Л. 1,0. Печ л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ №

195196, СПб, Малоохтинский пр. 98. РГТМУ

Отпечатано. Аркуш:

2003-A

8352