

## **РАСЧЕТ ВОДООБМЕНА И ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ГРАНИЦЕ ЛИЦЕНЗИОННОГО УЧАСТКА**

**Монахова Г.А., Попова Н.В., Попов С.К., Лобов А.Л., Рахимбирдиев Н.М.**

Расчеты переноса и баланса загрязняющих веществ в водных бассейнах играют важную роль в охране природных вод от загрязнения. Для выполнения этих расчетов, как правило, применяются гидродинамические модели, которые в зависимости от предназначения и режима эксплуатации можно разделить на два вида: резервные (офлайн) и оперативные (онлайн).

Резервные модели используются эпизодически для решения специальных задач, таких, как изучение биогеохимических процессов в водных экосистемах [7, 8], ОВОС гидротехнических сооружений, дноуглубительных и других работ, проводимых на водных объектах [4, 6, 11]. При этом все исходные параметры (метеорологические, гидрологические, экологические) задаются одновременно.

Оперативные модели используются ежедневно для расчетов (прогнозов) гидрологических параметров в зависимости от меняющихся метеорологических условий, данные о которых с установленной дискретностью поступают в гидрологический блок. В свою очередь для решения экологических задач к гидрологическому блоку должен быть подключен экологический блок на постоянной основе или в разовом порядке в зависимости от характера задачи.

В настоящее время оперативные гидродинамические модели морей используются в качестве основы для разработки прогнозов биогеохимических процессов [10], мониторинга состояния рыбных запасов, морских и прибрежных экосистем [5, 12], но наиболее широко они применяются для прогноза распространения нефтяных разливов (см., например, [9]).

Начиная с 2001 года, в Гидрометцентре России года для составления прогнозов штормовых нагонов, полей уровня моря и течений используется гидродинамическая модель Каспийского моря [1]. Исходными данными для нее служат выходные данные региональной метеорологической модели, также разработанной в Гидрометцентре России. При этом Каспий в течение длительного времени был единственным из российских морей, модель которого использовалась в оперативном режиме для подготовки морских гидрометеорологических прогнозов (недавно к нему присоединилось Баренцево море).

Для Каспия (также впервые из всех российских морей) была разработана по заказу компании «ЛУКОЙЛ» оперативная технология прогноза параметров аварийных нефти, состоящая из двух блоков, одним из которых является упомянутая выше оперативная

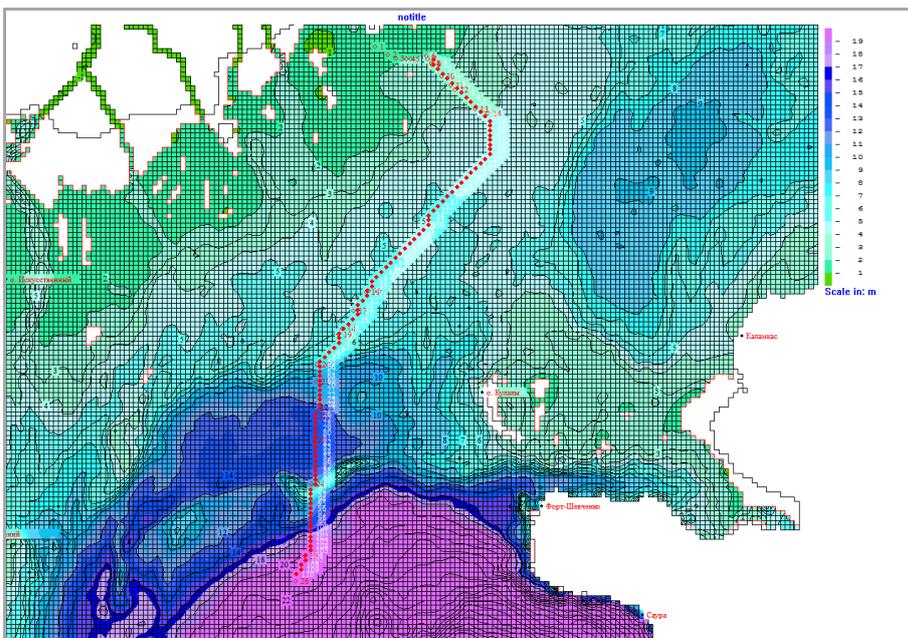
гидродинамическая модель Каспийского моря, а вторым – программный комплекс моделирования аварийных разливов нефти SPILLMOD [3].

В настоящее время в автоматизированной системе оперативной обработки информации Гидрометцентра России находится оперативная гидродинамическая модель Каспийского моря с разрешением 3x3 морские мили. Одновременно с ней проходит опытные испытания новая модель с разрешением 1x1 морская миля. Повышенное разрешение позволило более реалистично описать береговой и донный рельеф. Кроме того, в методику расчетов включены расходы в вершине дельты Волги [2].

Усовершенствование модели позволяет получать более адекватные расчетные характеристики уровня и течений, расширяет возможности ее применения, в т.ч. для решения задач мониторинга и охраны морской среды. Цель данной работы состояла в использовании усовершенствованной гидродинамической модели для расчета водообмена и переноса загрязняющих веществ на границах лицензионных участков, расположенных в российском секторе недропользования Каспийского моря.

Для первого экспериментального расчета был выбран лицензионный участок «Северо-Каспийская площадь», недропользователем которого является ООО «Каспийская нефтяная компания». При выборе учитывалось два обстоятельства. Во-первых, восточная и юго-восточная граница участка, для которой проводился расчет, совпадает с границей российского сектора недропользования и, таким образом, является не только хозяйственной, но международной границей. Во-вторых, начиная с 2001 года, на лицензионном участке «Северо-Каспийская площадь» проводится производственный экологический мониторинг, данные которого необходимы для расчета трансграничного переноса загрязняющих веществ. Граница лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь», лежащая между 44 град 20 мин и 45 град 30 мин северной широты, была разбита на 7 секторов путем проведения параллелей через каждые 10 минут (морских миль).

Адаптация модели высокого разрешения к диагностическим расчетам водообмена и трансграничного переноса загрязняющих веществ была выполнена в компании «Инфомар». В расчетах использовались модельные данные о скорости и направлении течения, а также компонентах X и Y скорости течения в каждой из ячеек модели, расположенной на разграничительной линии с установленной временной дискретностью 1 час (рис. 1).



**Рис. 1**  
Гидродинамическая модель Каспийского моря высокого разрешения.

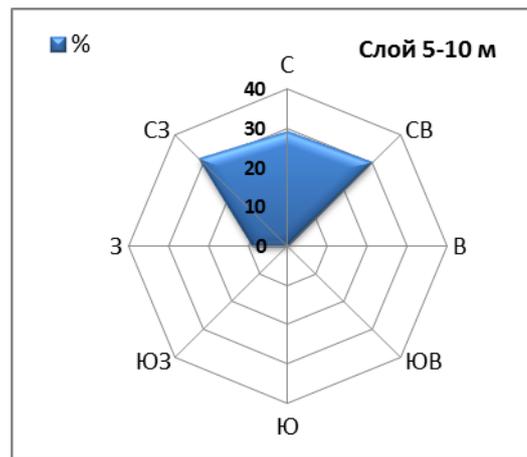
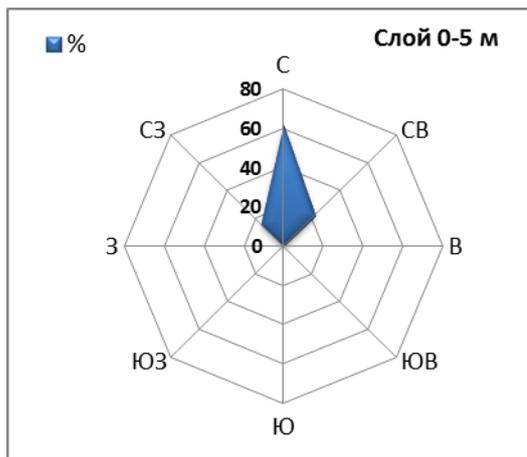
Схема расположения ячеек, использовавшихся для расчета водообмена и переноса ЗВ.

Размер ячейки (1852x1852x5м)

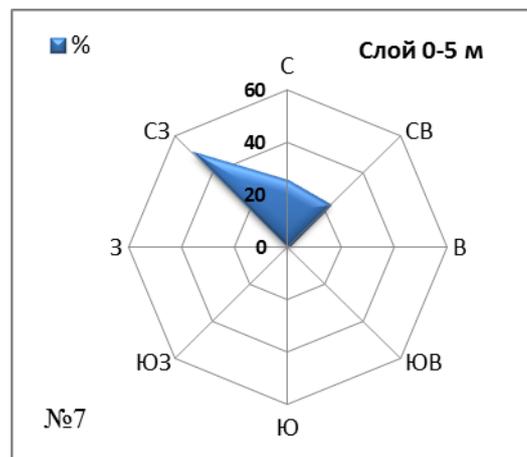
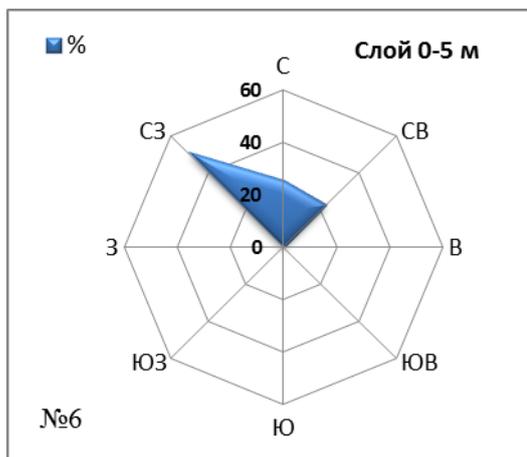
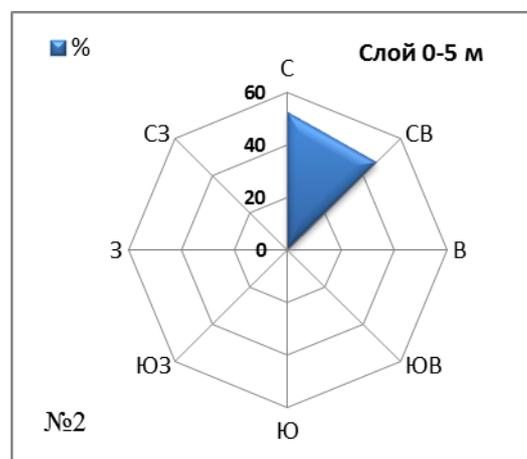
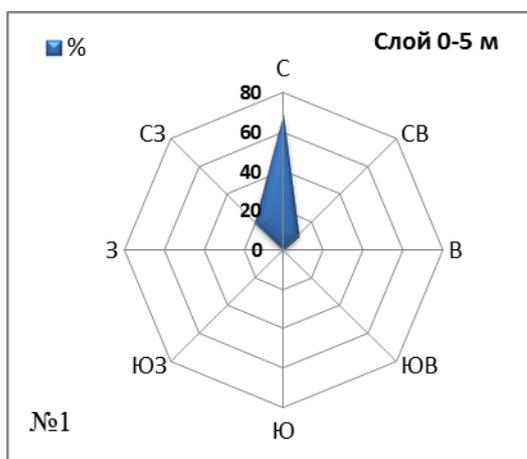
Протоколом расчетов для каждой ячейки было установлено соответствие компонентов скорости потокам воды внутрь и за пределы лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь». Далее для каждого сектора разграничительной линии, срока и слоя воды оценивались расходы воды внутрь и за его пределы. Полученные данные использовались для расчета суммарного суточного расхода воды ( $\text{км}^3/\text{сутки}$ ) внутрь и за пределы участка для отдельных секторов и слоев воды. Результаты расчетов обобщались для семи секторов и для разграничительной линии в целом. Кроме того, для каждого сектора, слоя воды и для разграничительной линии в целом рассчитывалась повторяемость течений по направлениям за сутки.

Сутки, для которых выполнялись расчеты, были выбраны произвольно, – 10 октября 2013 года. По результатам выполненных расчетов, в рассматриваемый период времени преобладали течения северной четверти, при этом в придонном слое течения варьировали по направлению более широко, чем в поверхностном слое (рис. 2). В северных секторах разграничительной линии (1 и 2) преобладали течения, направленные на север, в южных секторах (6 и 7) – направленные на северо-запад.

Данные о суммарных расходах воды внутрь и за пределы лицензионного участка использовались для расчета водообмена, который характеризовался четырьмя показателями, выраженными в  $\text{км}^3$ : притоком воды (b); оттоком воды (c); суммарным водообменом ( $a = b + c$ ); результирующим водообменом ( $d = b - c$ ).



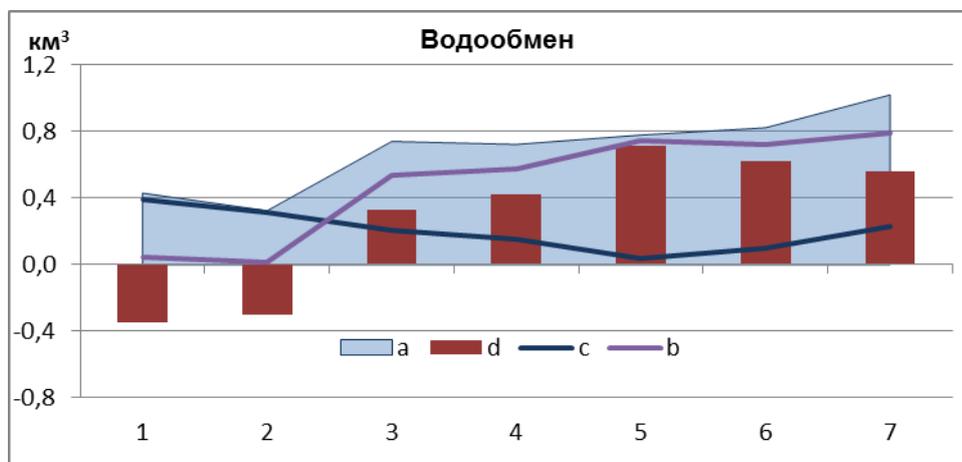
**Рис. 2** Повторяемость течений по направлениям (%) на восточной границе лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь» 10 октября 2013 года



**Рис. 3** Повторяемость течений по направлениям (%) в слое 0-5 м на восточной границе лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь» 10 октября 2013 года

По результатам расчетов на восточной границе лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь» 10 октября 2013 года суммарный водообмен составил  $4,84 \text{ км}^3$ . Приток воды за пределы лицензионного участка был выше оттока на  $2 \text{ км}^3$  (за пределы участка было вынесено  $1,42 \text{ км}^3$  воды, привнесено  $3,42 \text{ км}^3$ ). Интенсивность водообмена

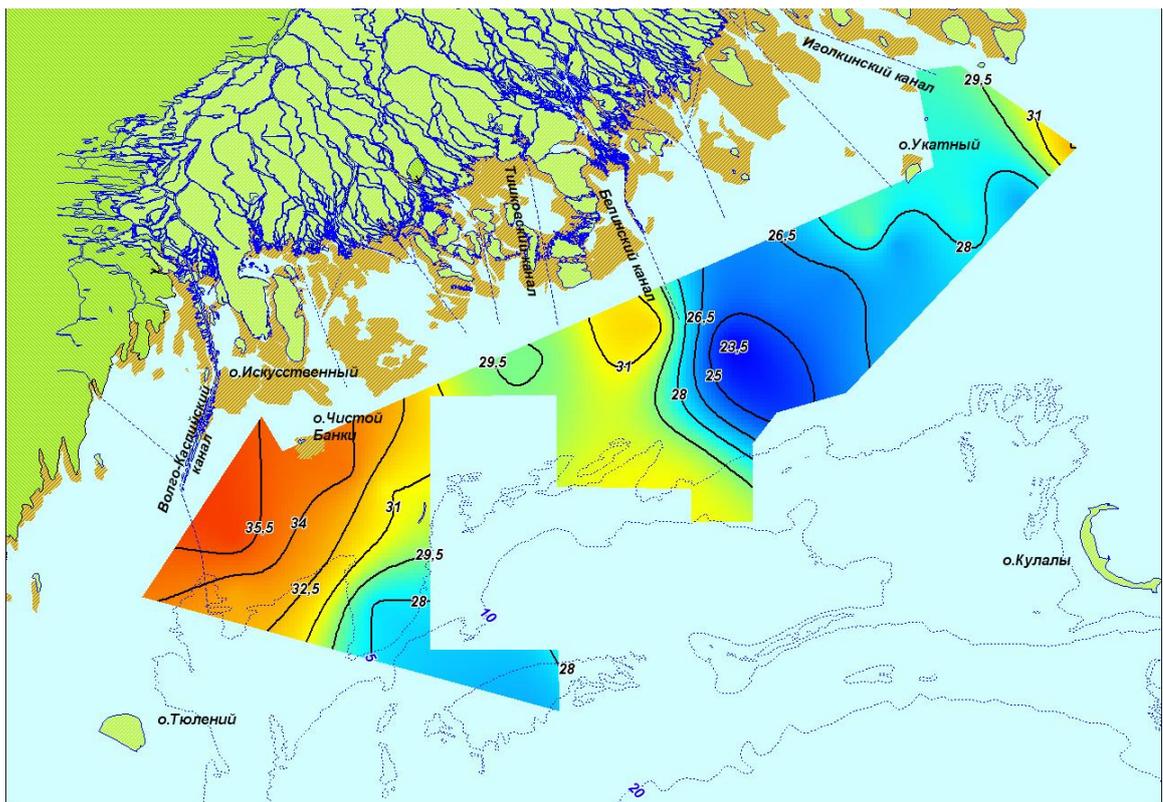
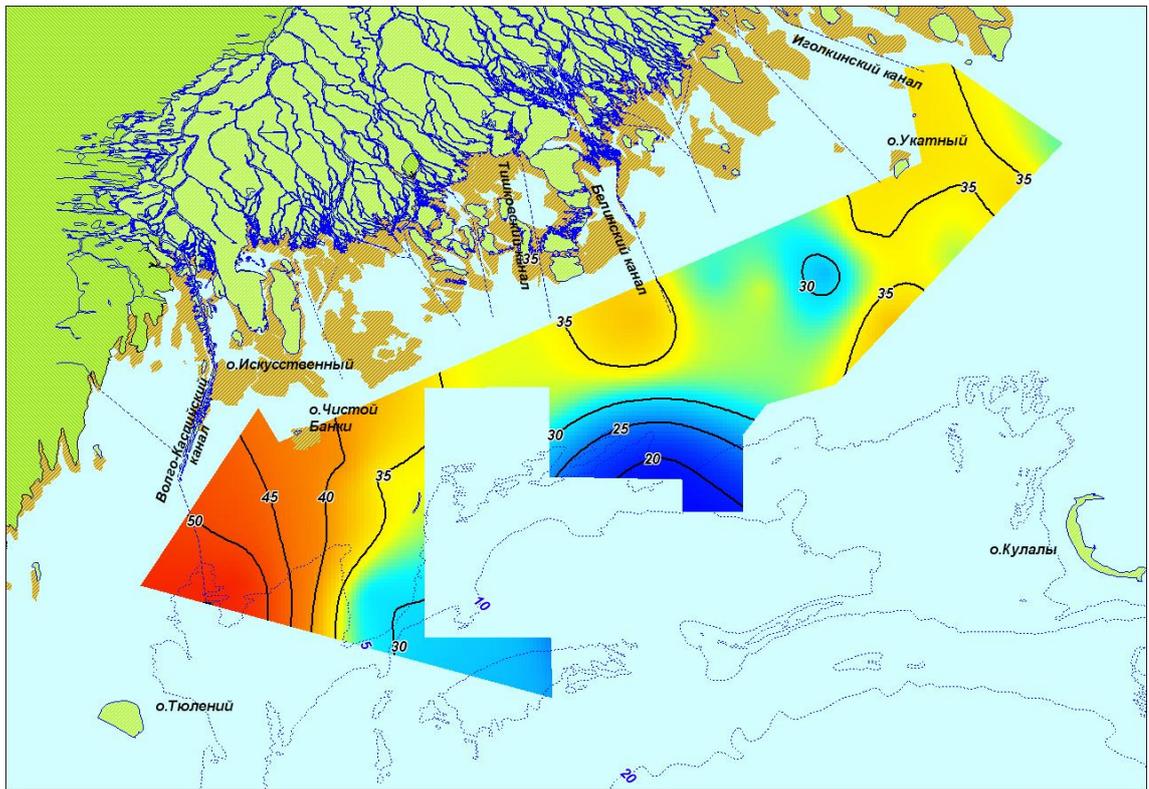
возрастала в направлении с севера на юг. В северных секторах разграничительной линии результирующий водообмен был отрицательным, а в центральных и южных – положительным (рис. 4).



**Рис. 4** Водообмен в различных секторах на восточной границе лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь» 10 октября 2013 года в слое 0-10 метров. На оси абсцисс – номера секторов с севера на юг; a – суммарный водообмен; b – приток; c – отток; d – результирующий водообмен

Данные о расходах воды внутрь и за пределы лицензионного участка можно использовать для расчета трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЗВ) при наличии данных об их концентрации в воде. Для этого в оптимальном варианте пункты наблюдений за загрязнением морских вод должны располагаться на границе лицензионного участка, а сами расчеты трансграничного переноса выполняться для даты проведения наблюдений. Еще лучше, если эти наблюдения будут проводиться с помощью автоматических буйковых станций, а данные наблюдений будут в оперативном режиме передавать в центр приема и обработки информации для проведения расчетов трансграничного переноса с использованием гидродинамической модели.

Все, о чем говорилось в предыдущем абзаце, – дело недалекого будущего, цель нашей работы состояла в демонстрации того, что оно вполне возможно. С учетом данного обстоятельства для проведения первых экспериментальных расчетов за среднесуточную концентрацию ЗВ на восточной границе лицензионного участка 10 октября 2012 года была принята средняя концентрация ЗВ за период 2006-2012 гг. Значения этой концентрации были сняты с карт пространственного распределения ЗВ в поверхностном и придонном слоях воды, примеры которых приведены на рис. 5, для каждого из семи секторов разграничительной линии в отдельности.



**Рис. 5** Пространственное распределение нефтепродуктов в поверхностном и придонном слое воды (тонн/км<sup>3</sup>) на участке «Северо-Каспийская площадь» в 2006-2012 гг.

Расчет трансграничного переноса осуществлялся в отношении 12 загрязняющих веществ: нефтепродуктов (НП), низкомолекулярных и высокомолекулярных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), суммы ПАУ, суммы ДДТ, суммы

ГХЦГ, суммы полихлорированных бифенилов (ПХБ), цинка, никеля, меди, свинца и кадмия. Его величина определялась путем умножения суммарного за сутки расхода воды ( $\text{км}^3/\text{сут}$ ) на среднюю концентрацию загрязняющего вещества ( $\text{тонн}/\text{км}^3$  или  $\text{кг}/\text{км}^3$ ). Трансграничный перенос так же, как водообмен, характеризовался четырьмя параметрами: суммарным переносом, притоком, оттоком ЗВ и результирующим переносом (приток минус отток). Результаты расчета данных параметров для некоторых их перечисленных выше ЗВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Трансграничный перенос загрязняющих веществ в различных секторах восточной границы лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь» 10 октября 2013 года. Показатели переноса ( а – суммарный перенос, b – приток, с – отток, d - результирующий перенос)

Показатель и переноса	Сектор							Итого
	1	2	3	4	5	6	7	
НП, тонн/сут								
a	14,17	10,44	22,93	22,38	23,93	23,23	28,04	145,11
b	1,35	0,41	16,62	17,72	22,89	20,42	21,68	101,10
c	12,82	10,03	6,31	4,66	1,04	2,80	6,35	44,01
d	-11,46	-9,62	10,32	13,06	21,84	17,62	15,33	57,09
Сумма ПАУ, кг/сут								
a	5,58	3,97	8,69	8,84	9,53	8,22	9,94	54,78
b	0,53	0,16	6,30	7,00	9,12	7,23	7,69	38,03
c	5,05	3,81	2,39	1,84	0,42	0,99	2,25	16,75
d	-4,52	-3,65	3,91	5,16	8,70	6,24	5,44	21,28
Сумма ДДТ, кг/сут								
a	0,16	0,11	0,26	0,25	0,27	0,25	0,23	1,53
b	0,02	0,00	0,19	0,20	0,26	0,22	0,18	1,06
c	0,15	0,11	0,07	0,05	0,01	0,03	0,05	0,47
d	-0,13	-0,10	0,12	0,15	0,25	0,19	0,13	0,59
Сумма ГХЦГ, кг/сут								
a	0,07	0,05	0,12	0,11	0,12	0,14	0,16	0,76
b	0,01	0,00	0,09	0,09	0,11	0,12	0,12	0,54
c	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,22
d	-0,05	-0,05	0,05	0,06	0,11	0,10	0,09	0,31
Сумма ПХБ, кг/сут								
a	0,53	0,40	0,91	0,94	1,01	1,01	1,22	6,01
b	0,05	0,02	0,66	0,74	0,97	0,89	0,95	4,27
c	0,48	0,38	0,25	0,20	0,04	0,12	0,28	1,74
d	-0,43	-0,37	0,41	0,55	0,92	0,76	0,67	2,52

Цинк, тонн/сут								
a	1,75	1,34	3,18	2,98	3,21	3,47	3,77	19,70
b	0,17	0,05	2,31	2,36	3,07	3,05	2,92	13,93
c	1,58	1,28	0,87	0,62	0,14	0,42	0,85	5,77
d	-1,42	-1,23	1,43	1,74	2,93	2,64	2,06	8,15
Никель, тонн/сут								
a	0,69	0,51	1,16	1,16	1,28	1,27	1,48	7,55
b	0,07	0,02	0,84	0,91	1,23	1,12	1,14	5,34
c	0,62	0,49	0,32	0,24	0,06	0,15	0,34	2,22
d	-0,56	-0,47	0,52	0,67	1,17	0,97	0,81	3,12
Медь, тонн/сут								
a	1,57	1,18	2,66	2,64	2,88	3,08	3,67	17,68
b	0,15	0,05	1,93	2,09	2,75	2,71	2,84	12,52
c	1,42	1,14	0,73	0,55	0,13	0,37	0,83	5,16
d	-1,27	-1,09	1,20	1,54	2,63	2,34	2,01	7,35
Свинец, тонн/сут								
a	0,60	0,45	0,98	0,96	1,05	1,09	1,35	6,48
b	0,06	0,02	0,71	0,76	1,00	0,96	1,04	4,55
c	0,54	0,44	0,27	0,20	0,05	0,13	0,31	1,93
d	-0,49	-0,42	0,44	0,56	0,96	0,83	0,74	2,62
Кадмий, тонн/сут								
a	0,04	0,03	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,40
b	0,00	0,00	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,28
c	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,12
d	-0,03	-0,03	0,03	0,03	0,06	0,05	0,04	0,15

С учетом того, что разовая и средняя концентрация ЗВ в воде на границе лицензионного участка представляют собой цифры одного порядка, результаты расчетов, приведенные в таблице 1, позволяют судить о порядке значений трансграничного переноса ЗВ. Как это хорошо видно, в зависимости от концентрации ЗВ в воде этот перенос может исчисляться как килограммами, так и тоннами в сутки.

В нашем экспериментальном случае концентрация загрязняющих веществ вдоль восточной границы лицензионного участка, как правило, варьировала слабо. Поэтому показатели трансграничного переноса в основном определялись характеристиками водообмена. В частности результирующий перенос для всей разграничительной линии был положительным (приток превышал отток). Однако его значения изменялись вдоль границы лицензионного участка, принимая в первых двух секторах отрицательные значения (отток превышал приток). На рис. 6 в качестве примера приведен график трансграничного переноса нефтепродуктов (видно что его своему характеру он схож с графиком водообмена, приведенном на рис. 4).

По результатам экспериментальных расчетов суммарный перенос нефтепродуктов (НП) на восточной границе лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь» составил 145,1 тонн, результирующий – 57,1 тонн (за пределы российского сектора было вынесено 44,0 тонн НП, а привнесено в него 101,1 тонн). Максимальный суммарный перенос отмечался в седьмом секторе, минимальный – во втором.

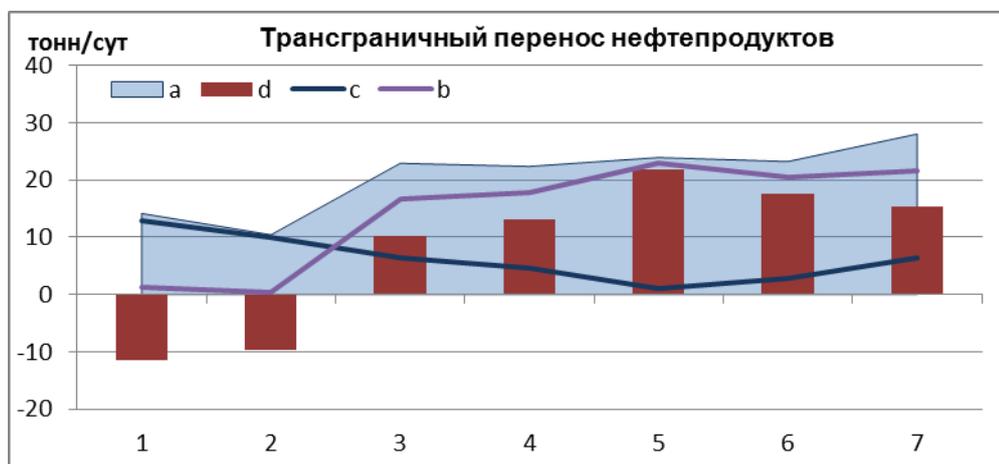


Рис. 6 Трансграничный перенос нефтепродуктов в различных секторах восточной границы лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь» 10 октября 2013 года. На оси абсцисс – номера секторов с севера на юг; a – суммарный перенос; b – приток; c – отток; d – результирующий перенос

Таким образом, в работе продемонстрирована принципиальная возможность использования оперативной гидродинамической модели Каспийского моря в ее усовершенствованном виде для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ на границе лицензионного участка (а также на границе российского сектора недропользования Каспийского моря).

Разработанная технология расчета трансграничного переноса загрязняющих веществ с использованием оперативной гидродинамической модели и данных мониторинга за загрязнением морских вод представляет собой яркий пример расширяющегося использования методов и технологий оперативной метеорологии и океанографии для охраны окружающей среды. Ожидается, что на Каспийском море она будет востребована для оценки загрязнения лицензионных участков, находящихся в недропользовании, российского сектора недропользования в целом, других секторов и частей Каспия, а также для разработки локальных, национальных и международных мер по защите морской среды от загрязнения.

## Литература

1. Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л. Метод краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря и результаты его испытаний // Гидрометцентр, Информационный сборник, 2002 – № 29. – С. 76-89.
2. Попов С.К., Батов В.И., Елисов В.В., Лобов А.Л. Усовершенствованная технология прогноза течений и уровня Каспийского моря. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2005 – № 7. – С. 53-59
3. Овсиенко С.Н., Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Шапочкин Д.А., Попов С.К., Ивченко А.А., Зацева С.Н., Лосев В.М., Пурина И.Э., Степанов Ю.А., Жабина И.И., Неудачина А.Ю., Бухаров В.М. Оперативная технология мониторинга и прогноза гидрометеорологических характеристик и параметров аварийных разливов нефти на акваториях морей. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2005 – № 7. – С. 59-68
4. Шапочкин Д.А., Лобов А.Л., Чумаков М.М., Зильберштейн О.И., Елисов В.В., Попов С.К., Попова Н.В. Опыт моделирования распространения взвеси при проведении дноуглубительных работ. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2003. – № 7. – С. 24-31
5. Berx, B., M. Dickey-Collas, M.D. Skogen, Y.-H. De Roeck, H. Klein, R. Barciela, R.M. Forster, E. Dombrowsky, M. Huret, M. Payne, Y. Sagarminaga, and C. Schrum. Does operational oceanography address the needs of fisheries and applied environmental scientists? // *Oceanography*, 2011. – V. 24, № 1. – P. 166–171.
6. EPA (Environmental Protection Authority). Environmental Assessment Guideline for Marine Dredging Proposals. – 2011. - URL: [http://edit.epa.wa.gov.au/EPADocLib/EAG7-Dredging\\_071011.pdf](http://edit.epa.wa.gov.au/EPADocLib/EAG7-Dredging_071011.pdf)
7. Herzfeld M., Parslow J., Margvelashvili N., Andrewartha J.R., Sakov P. Numerical Hydrodynamic modelling of the Derwent Estuary. Final Report. – Hobart, CSIRO. – 2005. – 91 p.
8. Margvelashvili N., Herzfeld M., Parslow J. Numerical modelling of fine sediment and zinc transport in the Derwent Estuary Derwent Estuary Program. Final Report - Hobart, CSIRO. – 2005. – 51 p.
9. Oil Spill Response: A global perspective / Edited by W.F. Davidson, K. Lee, A. Cogswell. – Springer, NATO SPS Series. – 2008. – 365 p.
10. Operational Oceanography in the 21st Century / Schiller, Andreas, Brassington, Gary B. (Eds.) – Springer. – 2011. - 450p.
11. Qiblawey H. Regional hydrodynamic modelling for environmental impact assessment due to desalination plants of Qatar // Qatar Foundation Annual Research Forum Proceedings: Vol. 2013, EEP 045. - DOI: 10.5339/qfarf.2013.EEP-045. Published online: 22 Nov 2013.
12. Sustainable Operational Oceanography / Edited by H. Dahlin, N.C. Flemming, S.E. Petersson. Proceedings of the Sixth International Conference on EuroGOOS4–6 October 2011, Sopot, Poland. – EuroGOOS. - 2013. – 382 p.